UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DA BANANA PACOVAN (*Musa paradisíaca*) EM DIFERENTES VARIÁVEIS OPERACIONAIS

IGOR MORAES BEZERRA CALIXTO

MANAUS - AM

2018

IGOR MORAES BEZERRA CALIXTO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DA BANANA PACOVAN (*Musa paradisíaca*) EM DIFERENTES VARIÁVEIS OPERACIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Yanne Katiussy Pereira Gurgel Aum.

MANAUS - AM

2018

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Calixto, Igor Moraes Bezerra
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DA BANANA PACOVAN (*Musa paradisíaca*) EM DIFERENTES VARIÁVEIS OPERACIONAIS/Igor Moraes Bezerra Calixto. 2018
87 f.: il.; 31 cm.

Orientadora: Dra. Yanne Katiussy Pereira Gurgel Aum
TCC de Graduação (Engenharia Química) - Universidade Federal do Amazonas.

1. banana pacovan (*Musa paradisíaca*). 2. secagem. 3. simulação. 4. modelos matemáticos.
I. Aum, Yanne Katiussy Pereira Gurgel
II. Universidade Federal do Amazonas
III. Título

IGOR MORAES BEZERRA CALIXTO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DA BANANA PACOVAN (*Musa paradisíaca*) EM DIFERENTES VARIÁVEIS OPERACIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 03 Dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

____

Prof. Dra. Yanne Katiussy Pereira Gurgel Aum

Universidade Federal do Amazonas

____

Prof. Dr. Nazareno de Pina Braga

Universidade Federal do Amazonas

____

Profa. Maiara Lopes Ferreira Sales

Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre ao meu lado e aos meus pais Marcelo Calixto e Milca Moraes por todos os incentivos, auxílios, conselhos e paciência durante todos os anos de minha vida e formação acadêmica.

A Profª Dra. Yanne Gurgel pelos conhecimentos transmitidos na orientação deste trabalho e por me auxiliar, acompanhar, orientar e fornecer suporte às atividades realizadas neste estudo.

A Universidade Federal do Amazonas pela infraestrutura fornecida para desenvolvimento das atividades realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Samuel Feitoza e Adriel pelo suporte prestado durante o meu desenvolvimento acadêmico em atividades laboratoriais no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Amazonas.

Aos amigos de graduação de Engenharia Química que trouxeram ao longo da convivência contribuições e colaborações em diversos projetos e atividades realizadas.

A Jessica Alves, José Pedro Wojeicchowski e Natalia Belluci por me proporcionarem importantes contribuições para entendimento dos parâmetros e passos necessários para utilização adequada do software Comsol Multiphysics.

Aos docentes dos departamentos de Matemática, Física, Computação, Estatística, Química e Engenharia Elétrica por proporcionarem a minha base de formação nos primeiros anos do curso.

E por fim aos demais docentes de Engenharia Química Nazareno Braga, Lanna Lôbo, Cristiane Daliassi, Ângela Costella, Ocileide Custódio, Douglas Castro, Edson Queiroz, Erick Mourão, Maiara Lopes e Franz Berbert que contribuíram com seus diversos ensinamentos para minha formação.

RESUMO

A utilização do simulador Comsol *Multiphysics* proporcionou o estudo detalhado de transferência mássica e térmica da secagem da Banana Pacovan, fruta muito consumida na Amazônia, de alto valor nutritivo e suscetível a rápida oxidação devido ao teor elevado de umidade. A obtenção dos dados experimentais de secagem da fruta foi realizada em 10 diferentes ensaios em estufa de circulação de ar até atingir a umidade de equilíbrio. Os experimentos foram realizados nas temperaturas de 60ºC, 70°C e 80°C em geometria cilíndrica com espessuras variáveis de 8 mm, 10 mm e 12 mm. Logo após a realização dos ensaios, realizou-se a simulação da secagem da fruta nas mesmas condições experimentais no *Comsol Multiphysics*, sendo definidas para isso as dimensões e geometria, modelos físicos, condições de contorno, propriedades da fruta, tipo de malha. O perfil de concentração molar de água na banana com o tempo apresentou erro médio reduzido entre os dados experimentais e simulados para a maioria dos ensaios realizados sendo possível atestar a validade do simulador para estudo de secagem de alimentos nas diferentes condições testadas. Os erros relativos médios da concentração molar de água oscilaram entre 2,35 % para a temperatura de 60°C com espessura de 12 mm e 21,48% para 80°C e 8 mm. Os menores erros relativos para o conjunto dos dados ocorreram na maior espessura já que a simulação não considerou o encolhimento de volume da banana durante o processo de secagem, sendo assim mais adequado simular com maiores dimensões da fruta. Por sua vez, em relação ao tratamento osmótico, ocorreu uma redução aproximada de 14 % da umidade inicial da fruta. Além disso, as condições ótimas de secagem foram alcançadas na maior temperatura acoplada a menor espessura. Ademais, modelos cinéticos de secagem foram ajustados aos dados experimentais e simulados obtendo-se como fator mínimo de ajuste R^2 de 0,996 para o modelo de Page e 0,972 para modelo de Lewis. Assim, o modelo de Page ajustou-se satisfatoriamente aos dados experimentais e simulados de secagem da Banana Pacovan. Dessa forma, o Comsol Multiphysics permitiu analisar a secagem da Banana Pacovan sendo relevante nos estudos de Engenharia Química.

Palavras-chave: Simulação; Comsol Multiphysics; Secagem; Banana Pacovan; Temperatura; Geometria Cilíndrica.

ABSTRACT

The use of the Comsol Multiphysics simulator provided the detailed study of the mass and thermal transfer of drying of Pacovan Banana, fruit widely consumed in the Amazon of high nutritional value and susceptible to rapid oxidation due to high moisture content. The experimental data of drying of the fruit were obtained in 10 different tests in air circulation stiln until reaching the equilibrium humidity. The experiments were performed at temperatures of 60 °C, 70 °C and 80 °C in cylindrical geometry with variable thicknesses of 8 mm, 10 mm and 12 mm. After the tests were carried out, the simulation of fruit drying was carried out under the same experimental conditions at Comsol Multiphysics, being defined the dimensions and geometry, physical models, boundary conditions, fruit properties, type of mesh. The molar concentration water profile in the banana with time presented reduced mean error between the experimental and simulated data for the majority of the tests carried out being possible to attest the validity of the simulator for the study of drying of foods in the different conditions tested. The mean relative errors of the molar water concentration ranged from 2.35% for the temperature of 60 °C with a thickness of 12 mm and 21.48% for 80 °C and 8 mm. The smaller relative errors for the data set occurred at the higher thickness since the simulation did not consider the volume shrinkage of the banana during the drying process, being therefore more appropriate to simulate with larger dimensions of the fruit. On the other hand, in relation to the osmotic treatment, an approximate reduction of 14% of the initial moisture of the fruit occurred. In addition, the optimum drying conditions were achieved at the highest temperature coupled to the lowest thickness. In addition, kinetic drying models were fitted to the experimental and simulated data, obtaining as a minimum adjustment factor R^2 of 0.996 for the Page model and 0.972 for the Lewis model. Thus, the Page model fitted satisfactorily to the experimental and simulated drying data of Pacovan Banana. With this, the Comsol Multiphysics allowed to analyze the drying of Banana Pacovan being relevant in the studies of Chemical Engineering.

Key words: Simulation; Comsol Multiphysics; Drying; Pacovan Banana; Temperature; Cilindric Geometry

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

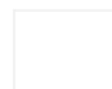
LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

X	Umidade em Base Seca	Adimensional
X_0	Umidade inicial	Adimensional
X_{eq}	Umidade de equilíbrio em base seca	Adimensional
U_{bu}	Umidade de Base Úmida	Adimensional
r	Coordenada Radial	m
t	Coordenada temporal	s
D	Difusividade Efetiva	m^2/s
D_0	Constante da equação para determinação da difusividade efetiva	m^2/s
E_a	Energia de ativação	J/mol
R	Constante dos gases	J/(mol*K)
T	Temperatura absoluta	K
RU	Razão de umidade	Adimensional
L	Espessura da fruta	m
N	Número de termos para determinação do coeficiente de difusividade efetiva	Adimensional
T	Tempo de secagem	s
h	Coeficiente convectivo de calor	$W/(m^2*K)$
Nu	Nusselt	Adimensional
l_∞	Condutividade térmica do ar	Kg/(m*s)
d	Diâmetro do material	m
Re	Adimensional de quantidade de movimento	Adimensional
Pr	Adimensional de transferência de calor	Adimensional
ρ_∞	Massa específica do ar	Kg/m^3
v_∞	Velocidade do ar	m/s
μ_∞	Viscosidade dinâmica do ar	Pa*s
$C_{p\infty}$	Calor específico do ar	J/(kg*K)
k_∞	Condutividade térmica do ar	W/(m*K)
α_∞	Coeficiente de difusividade térmica do ar	m^2/s

D_∞	Difusividade mássica da água no ar	m^2/s
k_b	Condutividade térmica da Banana	W/(m*K)
C_p	Calor Específico da Banana	J/(Kg*K)
ρ_{banana}	Massa Específica da Banana	Kg/m^3
C_p	Calor Específico da Banana	J/(kg*K)
k_b	Condutividade Térmica da Banana	W/(m*K)
MM_H_2O	Massa Molar de água	g/mol
k_m	Condutividade Térmica da água	W/(m*K)
lda	Calor Latente Molar de Vaporização da água	J/mol
C	Concentração Molar da água na Banana	mol/m^3
q	Fluxo de calor	W/m^2
∇T	Gradiente Térmico	K
D_{ab}	Coeficiente de difusividade de Fick	m^2/s
$N_{a,z}$	Fluxo Molar de A na direção z	mol/s^2
$N_{b,z}$	Fluxo Molar de B na direção z	mol/s^2
$\frac{\partial C_a}{\partial t}$	Gradiente de concentração por tempo	$mol/(s*m^3)$
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Gradiente de temperatura por tempo	K/s
$\frac{\partial x_a}{\partial z}$	Taxa de fração por posição	mol/m
∇T	Gradiente de fluxo térmico	W/m^2
R_a	Taxa de reação	Adimensional
m_{seca}	Massa seca	g
$m_{úmida}$	Massa úmida	g
T_r	Temperatura na superfície do produto	K
T_{inf}	Temperatura do ar de secagem	K
R´	Raio da fatia de banana pacovan	m
P	Erro Relativo Médio	Adimensional
N	Número de observações do experimento	Adimensional
Y	Valor Experimental de concentração molar	Adimensional
Y´	Valor observado na simulação de concentraçao molar	mol/m^3
SE	Desvio Médio	Adimensional
GLR	Graus de Liberdade	Adimensional

SUMÁRIO



1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização crescente de simuladores de processos de Engenharia Química tornou-se evidente nos últimos anos já que se trata de uma ferramenta que estuda com especificidade parâmetros que regem processos unitários comuns da Engenharia Química. Tendo enfoque ao estudo da desidratação de alimentos, este é um mecanismo transporte de matéria e energia comum na indústria farmacêutica, agrícola e de alimentos, sendo importante que sejam realizados estudos de simulação aprofundados para a implementação deste processo em nível científico e tecnológico (PONTES,2009).

Adicionalmente, a Região Norte apresenta grande diversidade vegetal, no entanto muitas espécies não são devidamente estudadas e aproveitadas devido à falta de conhecimento ou informações em relação às técnicas de conservação de frutas, hortaliças e demais tipos de vegetais, impactando na economia local. Dentro disso a secagem de produtos é uma operação unitária comum na Amazônia a fim de aumentar o tempo de estocagem de alimentos, uma vez que a redução do teor de água nestes reduz a probabilidade de propagação de microorganismos e oxigenação do produto (SILVA, BAHIA e RODRIGUES, 2015)

Ademais, a secagem trata-se de um conjunto de operações que se baseia na desidratação de um corpo a partir de algum mecanismo de transferência de calor e de massa. Através do fornecimento de calor a uma fruta, ocorre uma vaporização parcial da umidade presente na fruta, ocorrendo então uma redução de matéria presente no corpo sólido. Além disso, quão maior for a temperatura, o tempo de secagem e a velocidade do ar, menor será o teor de água presente na fruta. No entanto, o tempo em que a velocidade de secagem se torna constante é continuamente estudado, uma vez que indica que o corpo possivelmente não contem mais teor significativo de água, representando a umidade de equilíbrio do corpo estudado (GEANKOPLIS, 2009).

Além disso, o processo de secagem só será otimizado caso se saiba a quantidade de umidade a ser alcançada para que este processo não se prolongue demasiadamente e nem dure tempo insuficiente, sendo fundamental conhecer o comportamento da curva de secagem do produto nas condições trabalhadas, principalmente em relação à temperatura e velocidade de circulação do ar.

Sabendo-se disso, uma das alternativas mais interessantes para estudo da secagem é a utilização de simuladores tecnológicos de Engenharia como o *Comsol*

Multiphysics que, por meio de informações sobre a física do processo e das características do produto, simula o que ocorre durante a secagem, gerando diversas informações úteis para estudo. Este método apresenta-se bastante atrativo, considerando a rapidez e precisão da simulação computacional.

Ademais, Luyben (2013) afirma que os simuladores de processo se tornaram possíveis devido à disponibilidade de bancos de dados físico-químicos, pacotes de modelos matemáticos, métodos numéricos rápidos e precisos desenvolvidos pela indústria tecnológica nos ultimos anos. Com isso, é possível simular diversas variáveis operacionais na secagem com confiabilidade para aplicação industrial. Adicionalmente, o uso de simuladores apresenta como grandes vantagens a redução de custo e tempo para o desenvolvimento do projeto, além de proporcionar o estudo de diferentes variáveis no processo. Assim, avalia-se as condições ótimas operacionais de secagem da fruta.

Dessa forma, o uso do *Comsol Multiphysics* é muito aplicado por engenheiros, pesquisadores e docentes no estudo físico de processos, verificação de perfis operacionais e análise de variáveis importantes de estudo. A simulação deve ser realizada com a construção do modelo conceitual para determinação dos comportamentos esperados.

Assim, a partir das definições da secagem realizadas experimentalmente, é possível definir no simulador o modelo em termos de regime, o tipo e dimensões de geometria, tipo de malha, as propriedades do material, entre outras considerações. Com isso, é possível verificar gráficos e perfis que mostram a taxa de secagem, variação de umidade e a interferência da temperatura e da espessura na secagem de frutas.

Por conseguinte, a realização de secagem experimental da Banana Pacovan (*Musa paradisíaca*) em diferentes condições de temperatura e espessura acoplada a simulação no software mostra-se interessante acadêmica e tecnologicamente visto que o Brasil se trata de um dos grandes produtores mundiais de frutas, hortaliças e vegetais. Logo, a secagem é comum no processamento de alimentos sendo essencial entender as condições do processo para possível implementação e otimização.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a secagem da Banana Pacovan (*Musa paradisíaca*) em diferentes condições operacionais de temperatura e espessura a partir de dados experimentais e simulados.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o efeito das variáveis de temperatura, espessura e tratamento osmótico na secagem da Banana Pacovan;
- Simular a secagem da banana nas condições experimentais estudadas;
- Validar os resultados experimentais obtidos com a simulação;
- Verificar o ajuste de diferentes modelos da cinética de secagem da Banana Pacovan.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Banana Pacovan

3.1.1 Definições e Caracterização Físico-Química

As bananeiras (*Musa spp*.) são frutos comestíveis pertencentes à classe das Monocotiledôneas, ordem *Scitaminales*, família *Musaceae*, subfamília *Musoideae*, gênero Musa e seções Eumusa e Australimusa. Na seção Eumusa, localizam-se as bananas comestíveis, de grande valor comercial (MANICA, 1998), originária do continente Asiático, de onde foi disseminada para várias partes do mundo (CRUZ et all, 2014).

Além disso, a espécie *Musa paradisíaca*, conhecida popularmente como Banana Pacovan, pertence à família *Musaceae.* A banana é um dos frutos mais apreciados pela população brasileira e mundial, sendo frequentemente consumida em quase totalidade na forma *in natura* (DANTAS & SOARES FILHO, 1995).

Apesar das inúmeras cultivações de banana na Região Amazônica, esta espécie se destaca pelo seu tamanho e escassez em outras regiões. Essa banana é achatada em um dos lados, tem casca amarela escura, sua polpa é bem consistente, de cor rosada e textura macia e compacta, sendo mais rica em amido do que em açúcar, o que torna essa fruta, ideal para cozinhar, assar ou fritar (TODA FRUTA, 2009).

Além disso, é uma fruta vastamente encontrada na região Norte e Nordeste do Brasil, destacando-se a Bahia como principal produtora, onde o seu consumo se limita a basicamente a banana da terra frita e cozida. A Tabela 1 mostra a composição centesimal de diferentes formas de preparação de Banana Pacovan em 100 g de parte comestível.

Tabela 1: Composição centesimal das diferentes formas de preparação de banana em 100 g da parte comestível.

Formas de consumo	Umidade (%)	Proteína (%)	Cinza (%)	Lipídios (%)	Energia, cal
Banana madura in natura	60,8 ± 0,5	1,07 ± 0,01	1,01 ± 0,06	0,04 ± 0,005	152,9
Banana madura cozida	62,6 ± 0,9	1,21 ± 0,02	0,95 ± 0,01	0,17 ± 0,01	146,6
Banana madura frita	45,8 ± 1,9	1,66 ± 0,02	1,03 ± 0	3,31 ± 0,02	243,6
Banana verde in natura	63,0 ± 0,6	1,17 ± 0,03	0,93 ± 0,03	0,16 ± 0,01	145,0
Banana verde frita	56,29	2,10± 0,05	1,75± 0,01	22,41 ± 0,12	471,0

Fonte: YUYAMA *et al.,* 2001.

Yuyama *et al*. (2001) mostraram que o estado de maturação da fruta interfere diretamente na umidade da fruta, variando entre 56,29 % e 63,0 %, além de ser uma fonte proteica muito importante.

No entanto, a banana é biologicamente um dos frutos que apresenta uma das maiores perdas por decomposição após a colheita visto que a mesma é extremamente perecível, não permitindo o uso do frio para o armazenamento. Dessa forma a industrialização é uma das formas mais indicadas para um melhor aproveitamento da produção (SILVA, 1995).

Pontes (2009) disserta que diversos são os produtos que podem ser obtidos da banana como polpa ou purê, néctar, fruta em calda, produtos desidratados (banana liofilizada, flocos e fruta na forma de passa) e doces diversos, incluindo geleias e doce de massa (bananada). A fruta é consumida em sua quase totalidade na forma in natura, por populações de alta e baixa renda, em virtude do alto valor nutritivo e baixo custo.

Em termos nutricionais, Dantas e Soares Filho (1997) mostram que uma banana supre aproximadamente 25% da vitamina C, contem vitaminas A e B, alto teor de potássio e açúcares e pouco sódio, sendo então altamente nutritiva para consumo humano. Além disso, a ausência de suco na sua polpa, a ausência de sementes duras e a disponibilidade no mercado brasileiro e em diversos países do mundo, durante o ano todo, contribui fortemente para o seu alto consumo (LICHTEMBERG, 2001).

A mais flagrante modificação ocorrida durante o amadurecimento da banana é o amarelecimento da casca. Gaspareto (2005) disserta que a clorofila responsável pela coloração verde à casca da banana no estádio pré-climatério, é rapidamente degradada, dando lugar aos carotenóides, pigmentos amarelos que caracterizam a banana madura. O grau de coloração da casca da banana é um importante preditor de sua vida de prateleira e é muito utilizado como guia para sua distribuição no varejo. Com isso, o estádio de maturação da banana poder ser caracterizado subjetivamente, de acordo com o grau de coloração da casca, numa escala que varia de 1 a 7 como mostrado na Figura 1.

Figura 1: Diferentes estágios de maturação da Banana Pacovan.

1	Verde		Cor normal na colheita
2	Verde Claro		Primeira mudança de cor durante o processo de amadurecimento
3	Verde Amarelado		Mudança pronunciada de cor. Ideal para ser enviada ao varejista em estações de clima temperado
4	Mais amarelada do que verde		Cor recomendada para ser enviada ao varejista em estações de clima frio. Ideal para exposição pelo varejista
5	Amarelada com pontas verdes		Máximo amadurecimento para exposição pelo varejista
6	Totalmente amarela		Ideal para consumo
7	Amarela com pintas marrom		Completamente madura, com melhor sabor e maior valor nutritivo

Fonte: GASPARETO, 2005.

Como observado na Figura 1, o estado adequado para consumo da fruta considerando suas propriedades sensoriais, físico-químicas e estágio de maturação é quando a mesma está totalmente amarela.

3.1.2 Mercado e contexto nacional e regional

A evolução da indústria alimentícia no mundo mostra que as frutas são de grande importância no que se refere aos aspectos social, econômico e alimentar. Sabe-se que a fruticultura possibilita a exploração intensiva de áreas produtivas, tornando-as lucrativas. Além disso, utiliza elevada quantidade de mão-de-obra, constituindo-se numa fonte geradora de empregos não somente na produção, como também no armazenamento, no processamento e na comercialização de frutas (DAVILA, 2016).

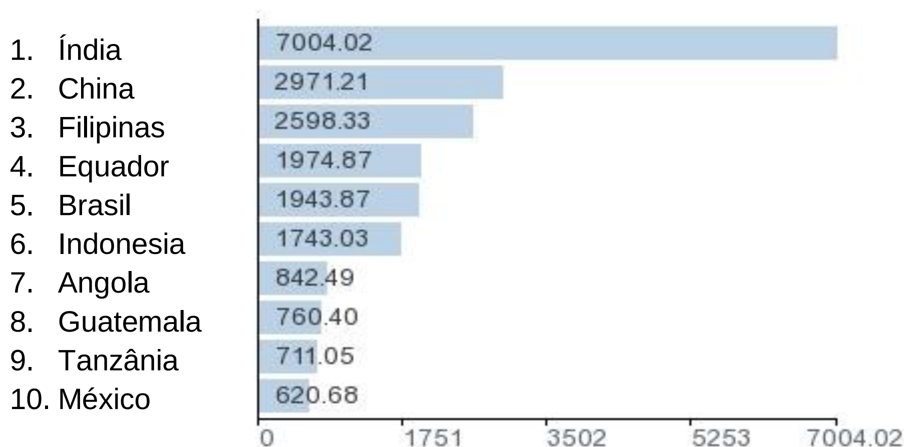
Dentro deste contexto, a banana é uma das frutas mais consumidas no planeta especialmente em países tropicais. A produção mundial alcançou 102 milhões de toneladas em 2012 e a produção estimada no Brasil foi de 7,3 milhões em 2014 (IBGE, 2014). Além disso, a Federação Internacional de Agricultura Orgânica apontou que o Brasil é o 10º maior produtor de orgânicos, considerando a área plantada (ORGANICNET, 2014).

Ademais, dados recentes mostram que a área de plantação de bananas está aumentando em muitos países da América Latina como República Dominicana (18,621 ha), Equador (12 062 ha), Peru (5,681 ha) e Costa Rica (5,681 ha). Os maiores importadores de banana produzida organicamente são os Estados Unidos, Canadá e a União Europeia segundo SOTO (2011).

No Brasil, a cultura de bananeiras encontrou boas condições de desenvolvimento, sendo cultivada em diversas regiões e uma das frutas de maior popularidade no país. Entretanto, em alguns estados, o cultivo sofre restrições em virtude de fatores climáticos. Como exemplo, em 2012, a produção de banana no Brasil foi de 6.846.611 t, com rendimento médio 14.361 kg/ha. Para safra de 2013, estima-se 7.303.967 t (IBGE, 2013)

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais das espécies de Banana muito em virtude das características geográficas e climáticas favoráveis ao cultivo desta fruta. A Figura 2 exemplifica isso com os países com maior produção mundial de cultivos de bananeiras.

Figura 2: Países com maior produção mundial de banana.



Fonte: The Global Economy, United Nations, 2012.

Dessa forma, a banana é uma das frutas mais produzidas e consumidas no mundo, sendo a base da economia de alguns países graças às características alimentares que implicam num elevado consumo nas diversas camadas da sociedade.

Ademais, as mais importantes variedades de banana no Brasil são as Bananas Prata, Pacovan, Maçã, Mysore, Terra e D´Angola e Nanica, Nanicão do genoma AAA (BORGES e CALDAS, 2004).

A Tabela 2 mostra os dados aferidos de produção nacional das variedades de Banana no Brasil.

Tabela 2: Principais regiões produtoras de banana no Brasil.

Regiões	Área Produtiva (ha)	Produção (t)	Participação (%)
Norte	70.576	829.959	12,02
Nordeste	197.295	2.424.974	35,13
Sudeste	139.811	2.298.477	33,30
Sul	53.307	1.077.263	15,61
Centro-Oeste	20.127	271.511	3,93
Brasil	481.116	6.902.184	100.00

Fonte: IBGE, 2012.

Além disso, segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção das cultivares de banana no Amazonas foi de 54.610 toneladas em 2014 e passou a 92.557 toneladas em 2015. Embora o Amazonas contribua com pouco mais de 1% para a produção nacional da fruta, a retomada da produção no Estado é importante para a segurança alimentar e geração de renda local, principalmente por ser um fruto de base alimentar da população e a atividade envolver agricultores familiares de portes pequeno e médio.

Adicionalmente, segundo o Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável do Estado do Amazonas (Idam), a produção e a comercialização de banana e derivados da fruta aumentou 20% entre os anos de 2016 e 2017. Entre cooperativas e associações, 70 agricultores familiares investiram em dois tipos do plantio da banana: a tapineu e a pacovan. Um novo sistema de irrigação por microaspersão, com aplicação feita por baixo das folhas, e usaram mudas do tipo Thap Maeo e Caipira. A mudança gerou potencial comercial, principalmente, por

semelhança à banana-maçã, uma das variedades mais apreciadas pela população da região amazonense.

3.2 Secagem

3.2.1 Secagem de frutas

Trata-se de um importante método de preservação de frutas que é definido como um processo de remoção de água por transferência simultânea de calor e massa. Secagem difere de outras técnicas de separação pelo movimento das moléculas que é obtido por transferência de massa do líquido ou vapor por uma diferença de pressão parcial da corrente entre a superfície do sólido evaporada e o ar que circunda. No caso de alimentos, a água deve ser removida para um nível mínimo em que a deterioração provocada por microorganismos pode ser minimizada (DELGADO, BARBOSA DE LIMA, 2014).

Ademais, a Região Norte de clima equatorial úmido é uma região suscetível a degradação rápida das frutas devido ao elevado teor de umidade que agiliza a oxidação das frutas e consequentemente causa prejuízos a empresários e produtores locais.

Além disso, Grensmith (1998) afirma que a secagem ou desidratação é uma técnica utilizada há muitos anos para a conservação de alimentos, uma vez que a água afeta de maneira decisiva o tempo de preservação dos produtos, influenciando diretamente na qualidade e durabilidade. O teor elevado de umidade favorece a propagação de microorganismos patogênicos favorecendo a oxidação mais rápida dos frutos.

Além disso, Park *et al*. (2002) afirmaram que a remoção parcial ou total de água de um alimento implicará na inibição do crescimento microbiano, na prevenção de reações bioquímicas responsáveis pela deterioração e em menores custos de transporte, embalagem e estocagem, constituindo um método importante para prolongar o tempo de prateleira de diversos produtos.

Com isso, entende-se que a secagem e desidratação osmótica são processos muito estudados para frutas, pois além do baixo custo de investimento confere aos produtos uma maior estabilidade pela remoção de água, sabor agradável e o aumento da oferta de produtos derivados de frutas. Trata-se de uma operação complexa que envolve transferência de calor e massa, sendo que o transporte de umidade do interior

para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido ou vapor dependendo do tipo de produto e do percentual de umidade presente. O processo de secagem deve ocorrer controladamente para que ocorra uniformemente, evitando elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do material que podem provocar a perda da qualidade do produto. Sabendo-se que os efeitos da secagem alteram as propriedades físicas e químicas do produto e que estes, por sua vez, afetam o processo de transferência de calor e massa, é fundamental conhecer os seus efeitos e o seu controle (FARIAS *et al.,* 2002).

Outrossim, Aguirre (2004) disserta que a desidratação é uma alternativa bastante conhecida para conservação de frutos. É um processo de fácil aplicação que, além de prolongar o tempo de vida útil do alimento diminui o peso do produto para o transporte e o espaço necessário para o armazenamento.

Com isso, a secagem de frutas como as bananas é utilizada não só para fins de preservação mas também devido ao valor agregado ao produto seco, como na produção de chips (DEMIREL e TURHAN, 2003) e banana-passa. Apesar das vantagens, os procedimentos de secagem são utilizados no país em pequena escala, basicamente para resolver problemas de excesso de produção (CANO-CHAUCA *et al.,* 2002). No entanto, a demanda do mercado consumidor por produtos que preservam ao máximo possível suas características originais vem aumentando nos últimos anos (EI-QUAR e MURR, 2003).

Fernandes et all (2011) mostraram que a maioria das frutas desidratadas atualmente são produzidas pela técnica da secagem de ar quente que é o método mais simples e econômico. Outras técnicas de secagem são propostas como a combinação de desidratação osmótica com ar quente de secagem ou a combinação de secagem fria prosseguida por ar de secagem ou vapor superaquecido.

Ademais, as propriedades termofísicas dos alimentos são importantes no projeto de equipamentos que envolve transferência térmica e mássica como a secagem porque este conhecimento é necessário no cálculo de cargas térmicas, dispêndios energéticos e dimensões de equipamento. Propriedades como densidade, difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica de materiais alimentícios são usados para estimar a demanda energética mas também uma ferramenta para predizer a qualidade alimentar e controle do processo.

Uma das maneiras mais eficientes de se analisar o processo de secagem de um determinado produto baseia-se no desenvolvimento de modelos matemáticos para

descrição do fenômeno físico como o emprego da simulação. Diversos modelos de simulação do processo de secagem são empregados no projeto de novos sistemas de secagem e na otimização dos já existentes ou ainda no controle do processo (KARATHANOS e BELESSIOTIS, 1999).

Adicionalmente, a secagem de produtos biológicos é controlada pelo mecanismo de difusão de líquido e ou de vapor durante o período de queda na taxa de secagem. A difusividade efetiva de umidade é uma importante propriedade de transporte, sendo útil na análise das operações de processamento de produtos alimentícios, como a secagem (ARÉVALO-PINEDO e MURR, 2005).

3.2.2 Principais métodos de secagem

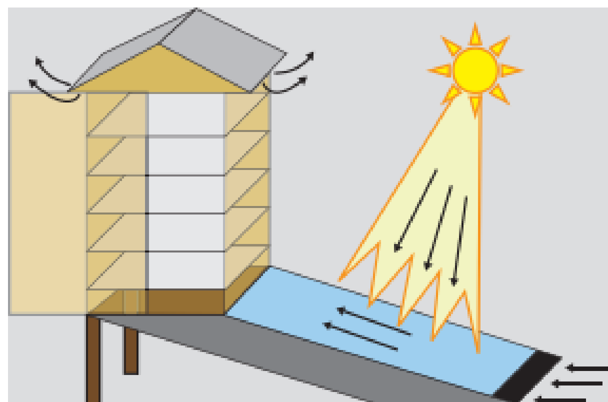
A secagem é uma operação unitária muito empregada na indústria de processos por meio de dois métodos mais convencionalmente conhecidos como secagem natural e secagem artificial ou desidratação.

3.2.2.1 Secagem Natural

A secagem natural é o procedimento mais antigo por se tratar de um método mais simples já que o alimento é simplesmente exposto à radiação solar sendo acondicionados em piso apropriado, capaz de reter calor e fazer com que o produto perca água por aquecimento e convecção. Além disso, este método é bastante econômico já que não se utiliza de subsídios energéticos para uso de equipamentos sofisticados de secagem, no entanto é lento e necessita de grandes áreas de exposição dos alimentos. Para este tipo de secagem, as condições climáticas da região onde ocorre o processo devem ser consideradas pois as propriedades psicrométricas como umidade relativa, volume específico e temperatura são determinantes para uma efetiva secagem (CELESTINO, 2010).

A Figura 3 mostra uma unidade de secagem natural muito utilizada em localidades em que a incidência solar é maior como nas regiões tropicais do planeta.

Figura 3: Unidade de desidratação natural.



Fonte: SOLAR, 2009.

3.2.2.2 Secagem Artificial

Outro método mais conhecido para desidratação de frutas trata-se da secagem artificial. Este é um método de desidratação em que a energia térmica é produzida artificialmente em estufas ou armazéns climatizados preparados para esta finalidade.

Celestino (2010) atesta que o primeiro processo conhecido de secagem artificial foi a criação de uma máquina para desidratação de frutas e vegetais na França no final do século XVIII. No entanto, a desidratação só passou a ser aplicada de forma significativa no século XX durante a I Grande Guerra em função da necessidade de alimentos em larga escala destinado a suprir as tropas em combate.

Ademais, este processo apresenta vantagens em relação a secagem natural como melhor controle de temperatura, umidade e corrente do ar. Além disso, trata-se de um método relativamente rápido e não exige grandes áreas de secagem. No entanto, este método exige capital e mão de obra qualificada. A secagem artificial pode ser feita por vapor superaquecido, sistema a vácuo, uso de gases inertes ou pela aplicação direta de calor.

Adicionalmente, a secagem artificial emprega como mecanismo majoritariamente controlador a convecção através do fluxo de ar quente com intervalo de velocidade que oscila entre 0,5 m/s e 3 m/s, não sendo desprezíveis, no entanto, o transporte térmico por condução e radiação. Celestino (2010) mostra que este processo se apresenta mais eficiente quando ocorre aumento da temperatura de ar e decréscimo da umidade relativa. Gava (2000) mostra também que a principal vantagem da secagem artificial em frutas e alimentos é a maior retenção de vitaminas por este processo.

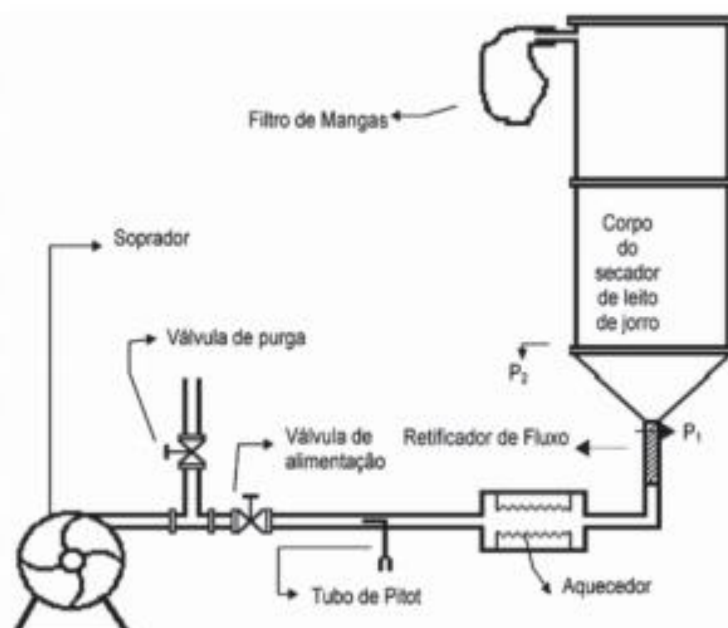
Um dos métodos mais empregados para secagem artificial trata-se do secador de bandejas. Em termos práticos, trata-se de uma estufa em que o alimento sólido é inserido uniformemente sobre uma bandeja com fundo tipo de metal e espessura variável entre 10 mm e 100 mm. Normalmente a circulação de ar é realizada por um ventilador situado atrás de resistências elétricas usadas para o aquecimento de ar da estufa. O controle de temperatura normalmente é realizado por um termostato.

Ademais, outro equipamento utilizado para a secagem trata-se do secador de túnel em que os sólidos são colocados em bandejas que se apoiam sobre uma barra móvel que possibilita a movimentação no interior do túnel. Geankoplis (2002) mostra que a velocidade de evaporação é maior se comparada ao processo de secador por bandejas.

Outros equipamentos muito utilizados na secagem são o processo por atomização (Spray-Dryer) e o Secador de leito fluidizado ou leito de jorro. Neste último, o ar quente atravessa um leito onde o alimento sólido está depositado e pela sua elevada velocidade, o ar quente é capaz de fluidizar esse alimento. Normalmente, os produtos alimentícios mais utilizados neste processo são a ervilha, farinha, café, sal, açúcar, carne, entre outros (CELESTINO, 2010).

A Figura 4 mostra um esquema simplificado de funcionamento do secador de leito fluidizado.

Figura 4: Esquema simplificado de leito fluidizado ou leito de jorro.



Fonte: DIAS *et all.*, 2000.

Outro equipamento muito conhecido utilizado na secagem trata-se do liofilizador que consiste na desidratação do alimento por sublimação onde o produto é congelado e sob vácuo desidrata. O sistema de vácuo deve reduzir a pressão para 1 mmHg, condição que deve ser mantida até o final da secagem. A vantagem desse processo são as perdas mínimas de nutrientes e uma rápida hidratação do produto seco.

3.2.3 Segunda Lei de Fick

Uma das maneiras mais conhecidas em literatura para a descrição da difusão de massa e calor em regime transiente é utilizando-se a Segunda Lei de Fick da Difusão. Sua dedução e exemplos de sua utilização podem ser encontrados em livros didáticos de fenômenos de transporte, por exemplo. Uma vez resolvida, descreve como calor ou massa se transporta num meio, tanto em função da posição quanto do tempo (WELTY *et al*., 2008). Por ser composta por uma equação diferencial parcial, são necessárias para sua solução uma condição inicial e duas condições de contorno.

A Segunda Lei de Fick da Difusão admite solução analítica quando hipóteses adequadas são levadas em conta. Como exemplo, Crank (1995) apresentou uma gama de soluções analíticas para a equação da difusão para várias geometrias diferentes. Destaque deve ser dado aos problemas que possuem variáveis separáveis e que admitem solução em forma de série infinita. Esta metodologia matemática é amplamente utilizada para a descrição do processo de difusão de massa na hidratação e secagem de alimentos, geralmente truncando a solução no primeiro termo da série, com principal intuito de estimar a difusividade mássica que é um parâmetro importantíssimo nos processos difusivos (NICOLIN, ROSSONI, JORGE, 2015).

Com isso, a Segunda Lei de Fick da Difusão foi obtida a partir de um balanço de massa transiente num elemento diferencial do volume de um grão de soja, considerado esférico e a volume constante. A Equação 1 apresenta isso. A condição inicial do problema estabelece que no início da hidratação os grãos possuem umidade conhecida e uniformemente distribuída conforme mostrado pela Equação 2. Por sua vez, a Equação 3 é a condição de simetria no centro da esfera e a Equação 4 é a condição de contorno na superfície e estabelece que neste ponto a umidade de

equilíbrio é atingida imediatamente.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D\left(\frac{2}{r}\frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2}\right)$$ Equação 1

$$X\,(r,0) = X_0 \ \ \forall\, r$$ Equação 2

$$\left(\frac{\partial X}{\partial r}\right)_{r=0} = 0\,;\ t > 0$$ Equação 3

$$X\,(R,t) = X_{eq} \ \ t > 0$$ Equação 4

Em que X a umidade em base seca, X_0 a umidade inicial em base seca, X_{eq} a umidade de equilíbrio em base seca, r a coordenada radial, R o raio dos grãos, t a coordenada temporal e D a difusividade efetiva.

3.2.4 Determinação da Difusividade Mássica Efetiva em produtos alimentícios

A difusividade efetividade de umidade é uma importante propriedade de transporte na modelagem de processos de secagem sendo função da temperatura e contéudo de umidade do material. No entanto, devido à complexa composição alimentar e estrutura física, a obtenção da difusividade torna-se díficil de ser estimada, levando a necessidade de medições experimentais segundo Vagenas; Karathanos (1993).

Kumar *et al.* (2012) mostraram que modelos matemáticos foram desenvolvidos para entender o mecanismo físico, otimizar eficiência energética e melhorar a qualidade do produto durante a secagem. As considerações matemáticas podem ser consideradas tanto empíricas quanto modelos fundamentais. Diversos modelos empíricos foram desenvolvidos e aplicados para diferentes produtos como a banana (SILVA, HAMAWAND e SILVA, 2014).

A estimativa do coeficiente de difusividade efetiva é essencial para modelos de secagem porque é o principal parâmetro que controla o processo com um elevado coeficiente de difusão, implicando em aumento da taxa de secagem. O coeficiente de difusão se altera durante a secagem em virtude dos efeitos da temperatura e da umidade (BATISTA, DA ROSA e PINTO, 2007).

Uma das equações clássicas para determinação do coeficiente de difusividade mássica é a relação deste com a energia de ativação do processo e a temperatura. A

Equação 5 mostra a determinação do coeficiente de difusividade mássica.

$$D = D_o.exp\left(\frac{-E_a}{R.T}\right) \quad \text{Equação 5}$$

Em que D é o coeficiente de difusividade mássica efetiva, D_0 uma constante dada em $m^2.s^{-1}$, E_a a energia de ativação em J/mol, R a constante dos gases e T a temperatura absoluta em K.

Cremasco (2002) afirma que os valores de difusividade efetiva média de umidade também podem ser determinados por meio da solução analítica da Lei de Fick considerando para o caso da difusão de água líquida em um sólido, levando-se em consideração as condições do material em análise, conforme a Equação 6.

$$RU = \left(\frac{8}{\pi^2}\right).\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2*n+1)^2}exp\left[-(2*n+1)^2*\pi^2*\frac{D*t}{4*L^2}\right] \quad \text{Equação 6}$$

Em que, *RU* é a razão de umidade, *L* é a espessura do material, *n* o número de termos e *t* o tempo de secagem.

3.2.5 Determinação do coeficiente convectivo de calor e de transferência de massa

Os coeficientes de transferência de calor (h) e de massa (h_m) são geralmente considerados na literatura de Engenharia de Alimentos como modelos que podem ser determinados usando clássicos adimensionais como Número de Nusselt ou correlação. A determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor é importante para diversos estudos de transporte térmico embora dados experimentais sejam escassos especialmente relacionados a processos térmicos alimentícios. A metodologia otimizada e as simulações numéricas para determinação do coeficiente convectivo (h) entre fluidos com propriedades variáveis e corpos com geometrias irregulares foram bem utilizados por SANTANA, AUGUSTO, CRISTIANINI (2011).

Holman (1986) apresenta uma correlação muito utilizada para estimativa do coeficiente convectivo em que o mesmo depende do Número de Nusselt, da condutividade térmica do ar e do diâmetro do material. As Equações 7 e 8 mostram as correlações utilizadas para determinação do coeficiente convectivo de

transferência térmica sendo a Equação (8) utilizada apenas quando Pr $\geq$ 0,7 e $0{,}4 \leq Re \leq 4\ x\ 10^5$

$$h = \frac{Nu * K_\infty}{d} \qquad \text{Equação 7}$$

$$Nu = 0{,}6387 * Re^{0{,}466} * Pr^{\left(\frac{1}{3}\right)} \qquad \text{Equação 8}$$

Em que h é o coeficiente convectivo de calor, Nu um parâmetro adimensional, K_∞ a condutividade térmica do ar, d o diâmetro do material, Re adimensional de quantidade de movimento e Pr adimensional de calor.

Por sua vez, para estimativa dos adimensionais de Reynolds e Prandt, as Equações 9 e 10 são utilizadas.

$$Re = \frac{\rho_\infty * v_\infty * d}{\mu_\infty} \qquad \text{Equação 9}$$

$$Pr = \frac{C_{p\infty} * \mu_\infty}{k_\infty} \qquad \text{Equação 10}$$

Em que ρ_∞ é a massa específica do ar, v_∞ é a velocidade do ar, μ_∞ é a viscosidade dinâmica do ar, $C_{p\infty}$ é o calor específico do ar e k_∞ a condutividade térmica do ar.

Ademais, para a estimativa do coeficiente de transferência de massa, Holman (1986) estabelece que este parâmetro é diretamente proporcional ao coeficiente convectivo de calor como demonstrado na Equação 11 em que α_∞ é a difusividade térmica do ar e D_∞ a difusividade mássica da água no ar.

$$h_m = \frac{h}{\rho_\infty C_{p\infty} \left(\frac{\alpha_\infty}{D_\infty}\right)^{2/3}} \qquad \text{Equação 11}$$

3.3 Desidratação Osmótica

Um método de conservação que está ganhando interesse é a desidratação osmótica de alimentos, que consiste na remoção parcial de água pela pressão osmótica quando se coloca o alimento em contato com uma solução hipertônica de solutos, reduzindo a atividade de água e aumentando a sua estabilidade, em

combinação com outros fatores como controle de pH, adição de antimicrobianos, etc. (POKHARKAR, 1997).

Ponting *et al*. (1966) estão entre os pioneiros a sugerirem a desidratação baseada no processo de troca osmótica. A desidratação osmótica, também denominada impregnação ou saturação, é uma técnica usada para a concentração por remoção da água de frutas inteiras ou em pedaços imersas em solução aquosa. Esta técnica é um dos métodos mais antigos de conservação de alimentos. O princípio do método consiste no aumento da concentração de sólidos nos frutos, substituindo a água por açúcares, como a sacarose. Pelo processo de osmose diminui-se a atividade de água reduzindo a deterioração do fruto (BERBARI *et al*., 1992).

Segundo Gianotti *et al*. (2001), este processo tem sido considerado um pré-tratamento, visto que a redução da disponibilidade de água no alimento não é, na maioria dos casos, suficiente para garantir a estabilidade do produto durante a estocagem, havendo necessidade de emprego de um processo subsequente de estabilização. A secagem por convecção, o uso de microondas, a liofilização ou o congelamento são alternativas de métodos complementares à desidratação osmótica.

A principal vantagem da desidratação osmótica como pré-tratamento antes da secagem convectiva de alimentos é que ela minimiza os impactos negativos desta última, como perda de aroma, escurecimento enzimático e perda da cor natural dos alimentos. Efeito protetor sobre a estrutura do alimento, gerando produtos mais flexíveis e macios, também tem sido observado (LENART, 1996).

Em geral, a desidratação osmótica maximiza a perda de água, e ao mesmo tempo, minimiza o ganho de soluto por parte do sólido (QI *et al*., 1998). Contudo, este processo geralmente não é capaz de abaixar a atividade de água a níveis que dispensem técnicas adicionais para conservação de alimentos. A secagem convectiva, por sua vez, diminui consideravelmente o teor de água no produto, o que minimiza o crescimento de microrganismos e reações de deterioração química, preservando-o durante a estocagem (MAYOR e SERENO, 2003), além de contribuir para a redução de custos de embalagem, transporte e armazenamento.

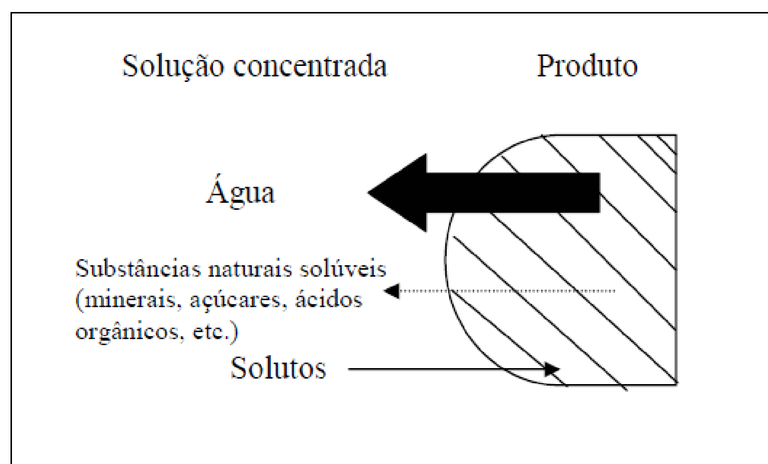
O processo de saturação com açúcar, conhecido há muito tempo, é bastante utilizado como um método de conservação de tecidos vegetais como frutas, hortaliças, flores para seu posterior aproveitamento em formulações de produtos industrializados como panetones, bolos, doces de confeitaria, bombons, sorvetes e pães especiais. Além disso, podem se destinar ao consumo imediato, como é o caso das frutas inteiras

ou em pedaços grandes ou, ainda, fins medicinais, no caso das hortaliças e ornamentação, no caso das flores (ALMEIDA, 2006).

No processo de desidratação osmótica, a complexa estrutura da parede celular dos tecidos dos vegetais age como uma membrana semipermeável, não completamente seletiva aos íons e compostos presentes tanto na solução osmótica quanto no interior do alimento (LENART e PIOTROWSKI, 2001). Estabelece-se com isso um fenômeno caracterizado por três tipos de fluxo durante o período em que o alimento está imerso na solução osmótica: fluxo de água do produto para a solução, fluxo de soluto da solução para o produto e fluxo de solutos naturais do produto (ácidos orgânicos, minerais, vitaminas etc) para a solução. Este terceiro tipo de transferência de massa, embora quantitativamente negligenciável quando comparado aos outros dois, desperta interesse pela possibilidade de, eventualmente, afetar as características sensoriais e nutricionais do produto (RAOULT-WACK, 1994).

A Figura 5 mostra um esquema simplificado da ocorrência de desidratação osmótica em alimentos.

Figura 5: Esquema simplificado de desidratação osmótica.



Fonte: RAOULT e WACK, 1994.

3.4 Comsol Multiphysics

Davila (2016) afirma que a evolução da indústria de softwares propiciou a criação de programas de simulação computacional de Engenharia que fossem capazes de estudar e modelar fenômenos de transportes e operações unitárias amplamente conhecidas pelos Engenheiros Químicos. Um dos simuladores mais conhecidos e utilizados trata-se do *COMSOL Multiphysics* que é um programa capaz

de analisar, resolver e simular numericamente diversos tipos de problemas físicos. Este software usa como base de suas análises numéricas o método dos elementos finitos (MEF) para gerar seus resultados. Esta análise é uma técnica numérica para resolver equações diferenciais parciais, fazendo aproximações matemáticas e minimizando fatores de erro de funções. Ademais, este programa permite interfaces de usuário convencionais baseadas em física e sistemas acoplados de equações diferenciais parciais (PDEs).

O software facilita todos os passos na modelagem do processo, incluindo a definição da geometria, malha, modelos físicos, resolução numérica e então a visualização dos resultados. Assim, este simulador é muito útil na simulação de secagem em que as propriedades do material variam com a temperatura e umidade (DAVILA, 2016).

Assim, o Comsol Multiphysics apresenta-se como um programa muito utilizado pelos estudantes e profissionais de engenharia uma vez que permite a simulação de diversos processos triviais como a programação de problemas de transporte de massa e calor, possibilitando estimar comportamentos para secagem do alimento.

3.5 Simulação de processos Químicos

3.5.1 Definições

A simulação de um processo pode ser definida como uma codificação matemática de um processo químico ou operação unitária com o objetivo de prever seu comportamento sem a necessidade de realização de experimentos e testes em unidade piloto ou industrial. Segundo Edgar e Himmeblau (2001), a codificação matemática também chamada de modelo é capaz de representar os aspectos principais do processo analisado, sendo este modelo baseado em dados do tipo entrada/saída medidos diretamente no sistema real ou em uma representação equivalente em menor escala.

Ademais, a simulação de processo pode envolver o acompanhamento do processo investigado em regime estacionário ou transiente sendo que a simulação em regime permanente é uma tecnologia consolidada com larga utilização na indústria de processos químicos desde a década de 1960. A simulação dinâmica ou transiente de processos é de uso mais recente com aplicações na área de controle de processos e treinamento de equipes de operação.

3.5.2 Método dos Elementos Finitos

Segundo Cook *et al.* (2002), a resolução de problemas contínuos era realizada somente por desenvolvimento direto dos sistemas de equações de derivadas parciais adotando as condições de contorno até a década de 1960. Desde então, o Método dos Elementos Finitos foi aprimorado e utilizado frequentemente em estudos fenomenológicos e operacionais de Engenharia.

Azevedo (2003) aborda que para reduzir a dificuldade de utilização desta técnica, recorria-se à Série de Fourier. Devido a complexidade de resolução, esses procedimentos só eram aplicados em sistemas homogêneos e de geometria simples. Para superar tais restrições, as derivadas exatas de difícil resolução eram substituídas por derivadas aproximadas.

O aperfeiçoamento desta técnica gerou como resultado o Método das Diferenças Finitas (MDF). Com o desenvolvimento dos computadores e busca constante dos pesquisadores em aprimorar esta técnica, surgiu o Método dos Elementos Finitos (MEF) (DHATT, TOUZOT, LEFRANÇOES, 2012).

Este método se baseia no uso de uma aproximação de variáveis desconhecidas a fim de transformar equações diferenciais parciais em equações algébricas através da substituição do problema real por outro semelhante. Ademais, para a resolução deste método é necessária uma equação integral, em que exista a possibilidade de substituí-la sobre um domínio complexo de volume (V) por um somatório de integrais considerando todos os subdomínios de geometria simples (DHATT, TOUZOT, LEFRANÇOES, 2012).

A malha normalmente utilizada é tão estruturada onde em problemas 2D, os elementos finitos são usualmente representados por triângulos ou quadriláteros enquanto que em 3D são os tetraedros ou hexaedros (GONÇALVES, 2007).

3.5.3 Malhas Computacionais

De acordo com Versteerg (2007), a malha computacional é uma representação discretizada do domínio no qual o problema será solucionado. O domínio da solução é primeiramente subdividido em um número finito de elementos. Após isso, com a reologia computacional e o método numérico adequado, o problema pode ser resolvido.

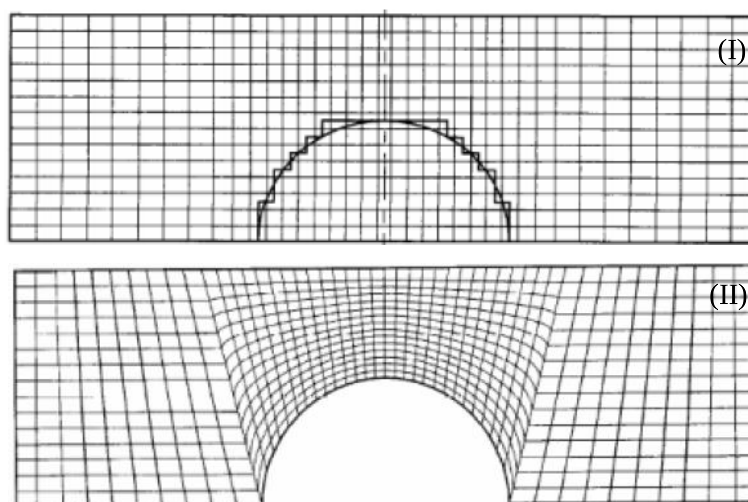
Os dois tipos de malhas conhecidos são do tipo ortogonais e não-ortogonais.

As malhas ortogonais são homogêneas, ou seja, o espaçamento entre os elementos finitos é igual, tanto na vertical como na horizontal (GONÇALVES, 2007).

Para superar as limitações das malhas ortogonais em geometrias complexas, foi desenvolvido as malhas não ortogonais. Para geometrias irregulares, por exemplo, a malha não estruturada é ideal. Nela todos os detalhes geométricos são incorporados de forma precisa e ainda a malha pode ser manipulada para abranger a região de interesse por meio do refinamento. Contudo as malhas não ortogonais são mais complexas que as malhas ortogonais equivalentes (VERSTEERG; MALALASEKERA, 2007).

A Figura 6 mostra os dois tipos de malhas computacionais conhecidos e aplicados em simulações de processos.

Figura 6: Tipos de Malhas Computacionais aplicados em simulação de processos. (I). Malhas Ortogonais; (II). Malhas Não-Ortogonais.



Fonte: VERSTEERG; MALALASEKERA, 2007.

3.5.4 Limitações dos simuladores de processos

Apesar das diferentes vantagens oferecidas pelos simuladores de processos em distintos campos da ciência e tecnologia, existem limitantes que podem dificultar a acurácia das predições de simulação. A primeira limitação se refere a erros inerentes à simulação originados na etapa de desenvolvimento do modelo pois para isso são utilizadas inúmeras considerações e simplificações como considerar um processo como adiabático por exemplo. Dentro disso ainda pode-se incluir erros referentes às limitações dos modelos termodinâmicos e cinéticos envolvidos (KERN, 2016).

Ainda segundo a autora, o segundo grande erro apresentado se refere a desvios referentes a informações fornecidas pela instrumentação de processo e dados de laboratório. Como consequência, os dados utilizados para calibrar e rodar a simulação podem apresentar limitações. Por fim, outra limitação dos simuladores é a possível discrepância entre valores gerados por uma simulação e os dados experimentais, sendo originados em parte devido à construção incorreta da simulação.

3.6 Contribuições científicas da simulação de secagem

O estudo da simulação de processos de secagem em frutos e vegetais no *Comsol Multiphysics* é muito promissora considerando a capacidade de predição do simulador em diversos casos e a otimização de tempo e custo para pesquisa no segmento. Considerando as necessidades de estudo a respeito de comportamento cinético e operacional da secagem, diversos estudos já foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos.

Silva, Bahia e Rodrigues (2015) realizaram a simulação de secagem osmo-convectiva da banana prata nas temperaturas de 68 ºC e 78 °C com velocidade do ar de 0,5 m/s e 1,0 m/s, comparando os resultados obtidos na simulação com os dados obtidos experimentalmente. Os autores realizaram 6 experimentos, sendo 4 com desidratação osmótica com solução de sacarose 60 % p/p e 70 % p/p e 2 ensaios sem desidratação e constataram que os desvios experimentais obtidos foram reduzidos ratificando a validade da simulação para otimização de processos de secagem.

Ademais, Borsato *et al.* (2010) simularam o processo de desidratação osmótica da maçã por difusão multicomponente em método simples no *Comsol Multiphysics*. Constataram que os desvios experimentais de coeficiente difusivo foram de apenas 5,76 % para a sacarose e 2,95 % para a água, sendo considerados resultados próximos dos dados experimentais. Observaram também que, desconsiderando o número de Biot para estimativa do processo de desidratação, a resistência externa no processo difusivo foi considerada desprezível na transferência de massa do fenômeno avaliado. Os autores concluíram que o sistema desenvolvido para simular a difusão da água e do soluto permitiram o controle do conteúdo de sacarose nos cilindros de maçã.

Ademais, Alves *et al.* (2016) realizaram o estudo da simulação da secagem de

resíduos de andiroba em secador tipo túnel, observando-se que os testes foram realizados nas temperaturas de 55ºC e 67°C com velocidade do ar de 1 m/s. Os autores constataram que a simulação realizada no *COMSOL Multiphysics* baseada no método de elementos finitos e utilizando os princípios da 2ª Lei de Fick e a Lei de Fourier apresentou boa representação dos dados experimentais. Assim, observaram que a simulação pode ser usada para predizer o comportamento de secagem em indústrias e como ferramenta para ensino de fenômenos de transportes.

Adicionalmente, Beluci *et al.* (2016) realizaram o estudo comparativo da difusão no processo de secagem da Banana Nanica por meio de simulação computacional e procedimento experimental. Os autores realizaram a secagem na temperatura de 65°C nas espessuras de 0,5 cm e 1 cm durante 86400 s, sendo obtido um erro médio respectivamente de 18,38 % e 7,54 %. Os autores observaram que a simulação deste processo foi mais adequada para geometrias com espessuras maiores já que na modelagem não foi considerado o encolhimento devido à perda de água.

Logo, a aplicação da simulação de programas computacionais relacionados à prática de secagem apresentam-se extremamente interessantes para estudo visto que a partir das definições corretas no simulador a confiabilidade dos parâmetros obtidos na simulação é aceitável em termos científicos.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais Utilizados

4.1.1 Matéria-Prima

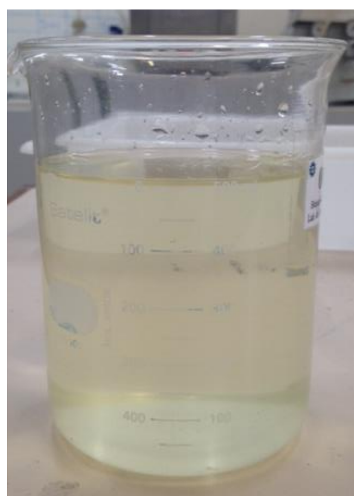
Para o procedimento de secagem, foram utilizadas Bananas Pacovan (*Musa paradisíaca*) adquiridas no Mercado Municipal localizado na cidade de Manaus (AM). As frutas foram selecionadas de acordo com tamanho, formato e grau de maturação.

4.1.2 Solução desidratante

As soluções desidratantes utilizadas no pré-tratamento osmótico foram preparadas com água destilada. A solução foi preparada a partir da sacarose comercial da marca União 50% (p/p) (CÓRDOVA, 2006). Para garantir que a concentração da solução osmótica permanecesse constante além da homogeneidade da mesma durante todo o processo de desidratação, o volume de solução utilizado foi aproximadamente 20 vezes maior que o volume ocupado pelos pedaços de banana (MOREIRA et al, 2009).

A Figura 7 exemplifica a preparação da solução osmótica de sacarose utilizada para o tratamento prévio por desidratação osmótica das fatias de Banana Pacovan.

Figura 7*:* Solução osmótica de sacarose 50 % p/p preparada previamente à secagem.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.2 Definição dos parâmetros iniciais da secagem

Inicialmente, realizou-se a secagem da fruta na estufa de circulação e renovação Limatec localizada no Laboratório de Controle de Qualidade da Universidade Federal do Amazonas. Para isso, a temperatura e a espessura da fruta a ser seca na estufa foram definidas na secagem. Utilizou-se como temperatura do ar o intervalo entre 60ºC e 80°C, também utilizado por Rodrigues *et al.* (2015). Ademais, adotou-se geometria cilíndrica da Banana Pacovan com espessura de fatia entre 8 mm e 12 mm, limites próximos dos adotados por Wojeicchowski (2015).

A partir das condições definidas de temperatura e espessura, definiu-se como intervalo de tempo 10 minutos para coleta das massas das amostras da fruta durante a secagem na hora inicial e depois um intervalo de 30 minutos entre as pesagens. O procedimento de desidratação da fruta continuou até a variação de massa ser desprezível nas últimas pesagens, indicando que a umidade de equilíbrio foi alcançada. Sabendo-se que a temperatura e a espessura da fruta são as duas variáveis independentes do processo de secagem, adotou-se o planejamento experimental fatorial do tipo 2^n+1 ponto central, sendo n o número de variáveis independentes (n = 2).

Com isso, realizaram-se ensaios experimentais nas condições propostas, sendo realizados 10 experimentos conforme representado pela Tabela 3, sendo metade destes precedidos de desidratação osmótica de sacarose a 50 % p/p e a outra parcela sem tratamento prévio.

Tabela 3: Condições Experimentais para secagem da Banana Pacovan em estufa.

Com desidratação osmótica			Sem desidratação osmótica		
Experimentos	Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Experimentos	Temperatura (°C)	Espessura (mm)
1	60	8	6	60	8
2	60	12	7	60	12
3	70	10	8	70	10
4	80	8	9	80	8
5	80	12	10	80	12

Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.3 Tratamento Osmótico

Na desidratação osmótica, uma solução aquosa de sacarose comercial 50% p/p foi utilizada no banho maria. O sistema constituído pelo banho e solução foi mantido a temperatura constante de 80ºC, uma vez que segundo Toreggiani (1993), acima desta temperatura ocorrem modificações nas características dos tecidos, favorecendo o fenômeno de impregnação e consequentemente o ganho de sólidos.

Com isso, escolheu-se a desidratação osmótica a 80 °C para as Bananas Pacvoan na proporção fruta/solução 1:20, conforme mostrado por Pontes (2009). Ademais, Maeda e Loreto (1998) mostraram que existe um limite para o conteúdo final de água no alimento que é o valor de equilíbrio com a solução osmótica. Com isso, adotou-se que o tratamento osmótico tivesse duração de 2 horas.

Finalizada a etapa de tratamento osmótico, as bananas foram retiradas da solução, promovendo escorrimento do excesso de solução. Foram coletadas as pesagens no início e no término do processo de desidratação osmótica sendo em seguida as fatias de banana levadas ao secador de bandejas para secagem.

A Figura 8 mostra a estrutura utilizada na etapa de tratamento osmótico utilizado previamente à secagem convectiva.

Figura 8: Tratamento Osmótico das soluções osmóticas com Banana Pacovan.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.4 Ensaios de Secagem

Os ensaios experimentais de secagem em diferentes condições de temperatura e espessura da *Musa paradisíaca* foram realizados no Laboratório de Controle de Qualidade na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas. Inicalmente, as frutas foram higienizadas com água corrente e fatiadas para espessuras de 8 mm, 10 mm e 12 mm com auxílio de paquímetro digital com comprimento de 150 mm. Verificou-se também que o diâmetro aproximado das frutas analisadas foi de $31,5 \pm 0,1$ mm.

Depois, as placas de Petri foram previamente identificadas, secas em estufa na temperatura de 100ºC durante 1 hora, passando depois por dessecador durante mais 30 minutos. Adotou-se este procedimento para eliminação de resíduos de água contidos nas vidrarias e assim reduzir os erros operacionais, conforme também realizado por Zendim (2017). Ademais, o anenômetro digital de marca AKSO também foi utilizado para medição da velocidade do ar de circulação contido na estufa cujo valor foi de $1 \pm 0,1$ m/s.

As fatias selecionadas de fruta foram posteriormente acondicionadas em placas de Petri previamente higienizadas para que pudessem ter sua massa inicial medida na Balança Semianalítica Gehaka.

A Figura 9 mostra a pesagem inicial das massas de fatias de Banana Pacovan para as espessuras consideradas de 8 mm, 10 mm e 12 mm, respectivamente.

Figura 9: Pesagem das fatias de Banana Pacovan de espessuras variadas.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Ademais, para a realização da secagem, as fatias já acondicionadas na Placa de Petri foram secas na estufa de circulação e renovação Limatec, mostrada na Figura 10. Para isso esperou-se a estabilização da temperatura através do termostato. Verificou-se que após a estabilização térmica na estufa de circulação a variação de temperatura foi inferior a 1°C.

Figura 10: Estufa de circulação e secagem da Banana Pacovan.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Utilizando-se um cronômetro, realizou-se a pesagem das amostras de fruta em intervalos de 10 minutos na hora inicial de secagem e depois em de meia em meia hora até atingir a estabilização da massa. No entanto, ressalta-se que as amostras passaram previamente pelo dessecador durante 10 minutos com intuito de impedir a absorção de água pela fruta enquanto sua temperatura se igualava à temperatura ambiente para que fosse posteriormente pesado.

Realizou-se então este procedimento de secagem até que a variação de massa nas medições não fosse mais considerável. Com isso, tornou-se possível quantificar a variação de umidade da banana do início do processo até a etapa final. Após atingir a umidade de equilíbrio, utilizou-se um analisador de umidade halogênio Ohaus localizado no Laboratório de Materiais e Compósitos, do Departamento de Pós-Graduação de Engenharia de Materiais para realizar a medição do teor de umidade residual das amostras após a etapa de secagem.

A Figura 11 mostra o equipamento utilizado para estimativa da umidade da fruta após secagem convectiva.

Figura 11: Analisador de Umidade Halogênio.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

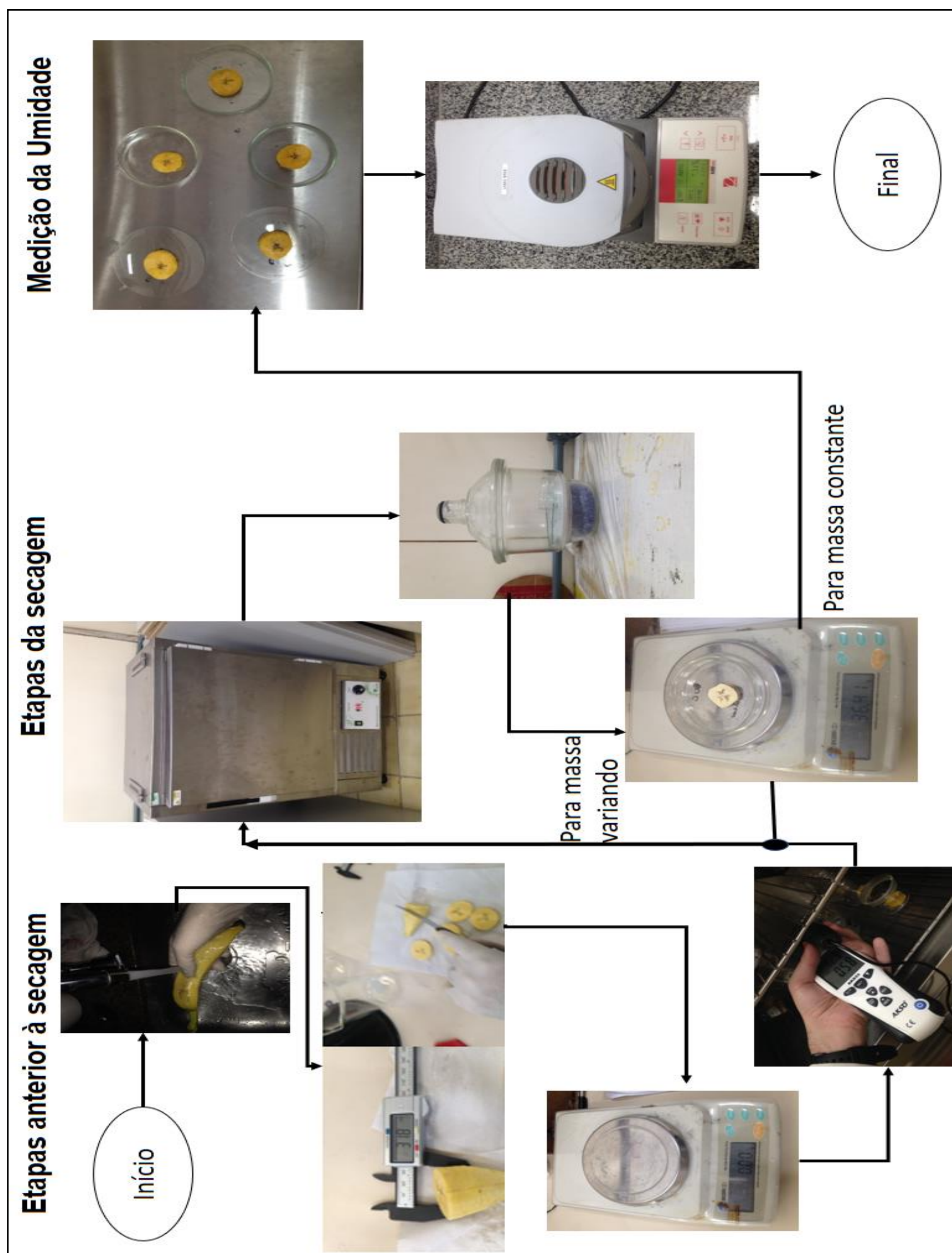
Ademais, de acordo com o Instituto Adolfo Lutz (1985), outro método amplamente utilizado para determinação da umidade de alimentos é a secagem direta em estufa a 105°C que consiste em secar uma amostra até peso constante e após resfriamento em dessecador verificar a massa final da mesma. Esta metodologia foi utilizada para a determinação do teor de umidade médio da fruta estudada.

A umidade pode ser quantificada pela diferença da massa inicial do alimento e da massa final sendo expressa percentualmente. A equação 12 mostra a estimativa de umidade realizada pelo método Adolfo Lutz.

$$Umidade = \left(\frac{Massa\ Inicial}{Massa\ Final - Massa\ Inicial}\right) * 100 \qquad \text{Equação 12}$$

A Figura 12 mostra resumidamente um fluxograma das etapas experimentais para a secagem convectiva das fatias de Banana Pacovan.

Figura 12: Fluxograma dos ensaios de secagem da Banana Pacovan.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

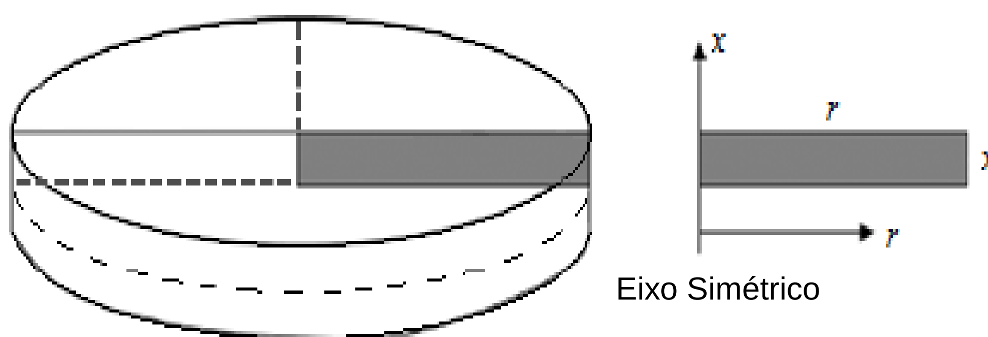
4.5 Simulação no Comsol Multiphysics

4.5.1 Parâmetros Iniciais para modelagem do processo

Para a simulação da secagem convectiva nas condições propostas de temperatura e espessura, devem-se levar em consideração algumas variáveis importantes do processo para que a modelagem seja realizada adequadamente. Assim, consideraram-se algumas hipóteses simplificadoras de análise do processo estudado no software. Uma das considerações foi a geometria simétrica axial em 2D, uma vez que a análise do simulador considera as dimensões do raio e espessura.

A Figura 13 mostra a geometria utilizada como modelo básico para implementação no Comsol Multiphysics.

Figura 13: Geometria de fatia de banana em 2 dimensões axis-simétrico.



Fonte: KUMAR, MILLAR, MARIN, 2015.

Ademais, utilizou-se como modelos físicos na simulação a transferência de calor por condução e o transporte de espécies diluídas por difusão molecular uma vez que a secagem envolve a transferência térmica e mássica por convecção e difusão da água presente na fruta, além da própria condução térmica que existe no processo.

Para o processo de secagem convectiva de Banana Pacovan, algumas importantes considerações foram realizadas para a modelagem do processo. A Tabela 4 mostra as hipóteses consideradas no processo analisado.

Tabela 4: Hipóteses simplificadoras para modelagem no Comsol Multiphysics.

Nº	Considerações
1	A distribuição inicial de umidade e temperatura na banana são uniformes.
2	Não foi considerado o encolhimento de volume da fatia;
3	As condições de secagem do ar são constantes durante o processo;
4	O transporte molecular de água pode ser descrito pela 2ª Lei de Fick;
5	As propriedades térmicas variaram com o processo

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Adicionalmente, além do conhecimento fenomenológico e físico do caso, algumas variáveis são fundamentais para que a modelagem seja realizada adequadamente. Assim algumas destas variáveis foram definidas na Tabela 5 como as propriedades do ar e da água, do material e as condições do processo.

Tabela 5: Variáveis físicas da secagem da Banana Pacovan.

Parâmetros	60°C	70ºC	80ºC	Unidade
Densidade da banana (ρ_{banana})*	1018	1018	1018	Kg/m^3
Calor específico da banana (C_p)		Correlação		J/(Kg.K)
Condutividade Térmica da banana (k_b)		Correlação		W/(mK)
Temperatura Inicial da Banana (T_0)	25	25	25	°C
Concentração Inicial da Banana (C_0)	36761,11	36761,11	36761,11	mol/m^3
Massa Molar da água (MM_H_2O)	18	18	18	g/mol
Condutividade Térmica da água (k_m)**	$8,08x10^{-9}$	$5,68x10^{-9}$	$3,28x10^{-9}$	kg/(m*s)
Difusividade mássica água/ar (D_∞)****	$4,37x10^{-9}$	$5,12x10^{-5}$	$6,09x10^{-5}$	m^2/s
Velocidade do ar (v_∞)	1	1	1	m/s
Densidade do ar (ρ_∞)***	1,060	1,03	1,00	Kg/m^3
Condutividade Térmica do ar (k_∞)*	0,029	0,029	0,030	W/(m.K)
Calor Específico do ar ($C_{p\infty}$)**	1017	1018	1019	J/(Kg.K)
Difusividade Térmica do ar (α_∞)****	$2,68x10^{-5}$	$2,82x10^{-5}$	$2,96x10^{-5}$	m^2/s
Viscosidade do ar (μ_∞)***	$2,00x10^{-5}$	$2,05x10^{-5}$	$2,09x10^{-5}$	Pa.s
Coeficiente convectivo (h)	17,67	17,65	17,64	$W/(m^2K)$
Coeficiente de transf. Massa (h_m)	$4,899x10^{-5}$	$5,40x10^{-5}$	$6,03x10^{-5}$	m/s
Calor Latente Vap. Água (*lda*)****	41400	41400	41400	J/mol

Fonte: KUMAR *et al.**, 2012, Maloney**, 2008, Wojeicchowski *et al.****, 2015, INCROPERA & DEWITT****, 2008.

Para estimativa das propriedades térmicas de calor específico e condutividade térmica da fruta, foram utilizadas respectivamente as Equações 13 e 14 na definição das variáveis locais no Comsol Multiphysics (CHEN, 2007). Considerou-se, nesta modelagem, que as variáveis térmicas não são constantes durante o processo, sendo necessário dessa forma adicionar as relações que estes parâmetros dependem.

$$C_p = 3017,2 + 2,05 * \Delta T + 0,24 * (\Delta T)^2 + 0,002 * (\Delta T)^3 \quad \text{Equação 13}$$

$$k_b = 0,194 + 0,436 * C * MM_H_2O/\rho_{banana} \quad \text{Equação 14}$$

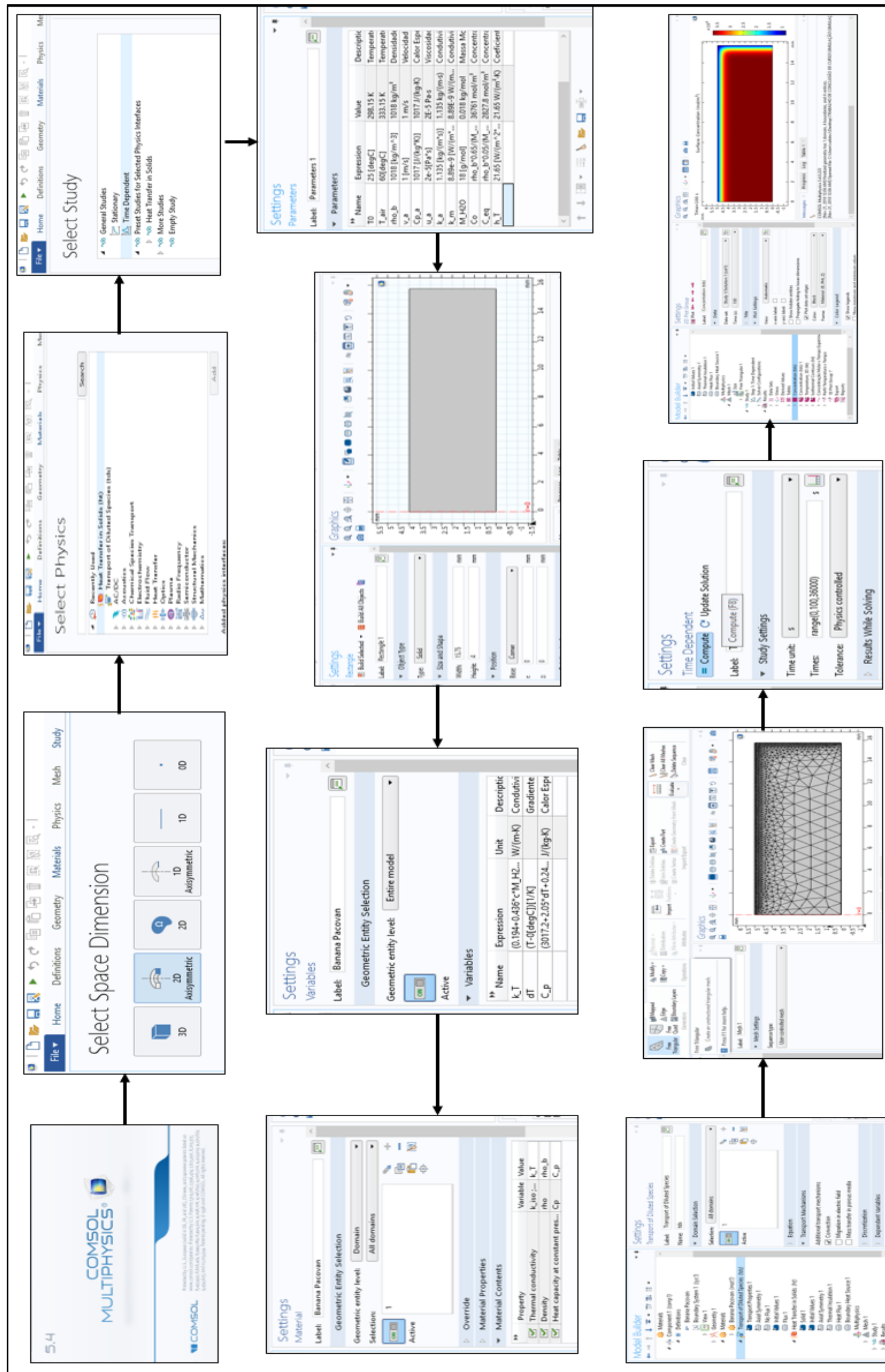
Em que ΔT é a variação de temperatura que ocorre durante o processo, C é a concentração molar, MM_H_2O é a massa molecular de água e ρ_{banana} a massa específica da Banana Pacovan.

Além disso, para comparação dos dados da secagem experimental e simulada, os dados de umidade obtidos em cada experimento foram convertidos para concentração molar de água na fruta a partir da Equação 15 em que u_{bu} é a umidade em base úmida.

$$C = \frac{U_{bu} \cdot \rho_{banana}}{MM_H_2O} \quad \text{Equação 15}$$

A Figura 14 mostra um fluxograma das etapas utilizadas na simulação da secagem convectiva da Banana Pacovan no Comsol Multiphysics.

Figura 14: Etapas para simulação de secagem convectiva no Comsol Multiphysics.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.5.2 Modelos Físicos do Processo

Para modelagem do processo, deve-se conhecer os fenômenos físicos que ocorrem na secagem. A transferência térmica por calor no processo ocorre em boa parte devido à condução térmica do processo. A partir disso, a Lei de Fourier determina o fluxo térmico devido à condução que é proporcional ao gradiente de temperatura segundo Bird, Stewart & Lightfoot (2008) mostrada pela Equação 16.

$$q = -k.\nabla T \qquad \text{Equação 16}$$

O ∇T representa o gradiente térmico em todas as direções seja em coordenadas cartesianas, cilíndricas ou esféricas.

Adicionalmente, a equação da Lei de Fourier pode ser inserida na equação de energia em termos de calor e pode ser escrita pela Equação 17.

$$\rho.C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -(\nabla \mathrm{q}) - \frac{\partial ln\rho}{\partial lnT}.\frac{dp}{dt} - (\tau.\nabla v) \qquad \text{Equação 17}$$

Em que ρ é a massa específica, C_p é o calor específico, $\frac{\partial T}{\partial t}$ a taxa de variação da temperatura com o tempo, $\nabla \mathrm{q}$ é o gradiente de fluxo térmico e $(\tau.\nabla v)$ é o tensor de fluxo do momento viscoso.

Ademais, outro fenômeno físico paralelo na secagem estudada é a transferência mássica descrita pela Lei de Fick que representa a difusão sendo o transporte molecular relativo entre duas substâncias e a convecção que é o transporte macroscópico. A Equação 18 mostra a equação da 1ª Lei de Fick (GEANKOPLIS, 2009).

$$N_{a,z} = -C.D_{ab}.\frac{\partial x_a}{\partial z} + x_a(N_{a,z} + N_{b,z}) \qquad \text{Equação 18}$$

Em que C é concentração molar, D_{ab} é coeficiente de difusividade mássica, $\frac{\partial x_a}{\partial z}$ é a taxa de variação de concentração com comprimento e $x_a(N_{a,z} + N_{b,z})$ é o fluxo convectivo.

Como não se tem fluxo convectivo no processo considerado nesta simulação, o segundo termo da equação 18 é desprezado na modelagem matemática. Por sua vez, a relação da concentração com o tempo é dada pela Equação 19.

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = -(\nabla N_{a,z}) + R_a \qquad \text{Equação 19}$$

Em que $\frac{\partial C_a}{\partial t}$ é a taxa de variação de concentração com o tempo, $\nabla N_{a,z}$ é o gradiente do fluxo molar e R_a é a taxa de reação.

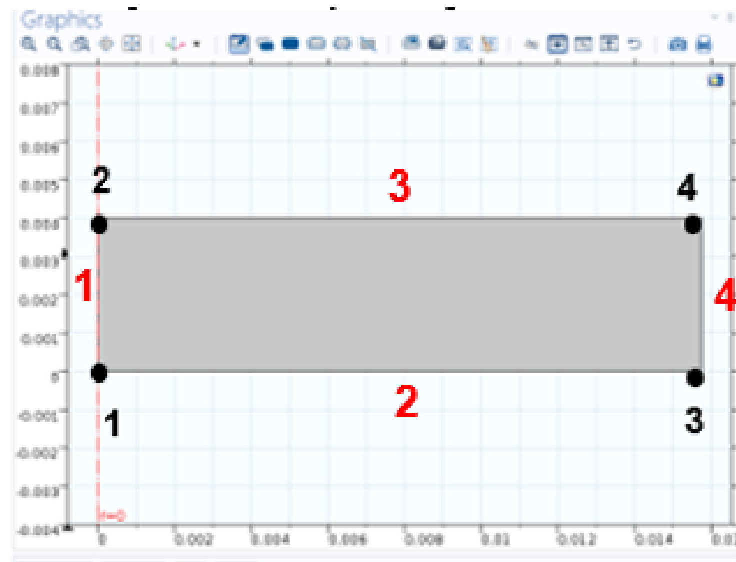
Como no processo considerado não houve reação química, o termo R_a é considerado desprezado na modelagem. Com isso, substituindo-se a Equação 18 na Equação 19, obtêm-se o perfil de concentração por tempo.

4.5.3 Geometria e Condições de Contorno

Outra etapa fundamental para acuracidade da modelagem no Comsol Multiphysics é a definição da geometria e das condições de contorno do processo estudado. A geometria construída foi baseada nas medidas da secção transversal de uma fatia de banana com 3,175 cm de diâmetro e espessura variável de 8 mm, 10 mm ou 12 mm, dependendo do experimento. Para isso, definiu-se uma geometria 2D com um retângulo de medidas 15,75 mm pela espessura (e).

A Figura 15 mostra as definições iniciais da geometria da fatia de Banana Pacovan para espessura de 8 mm e raio de 15,75 mm.

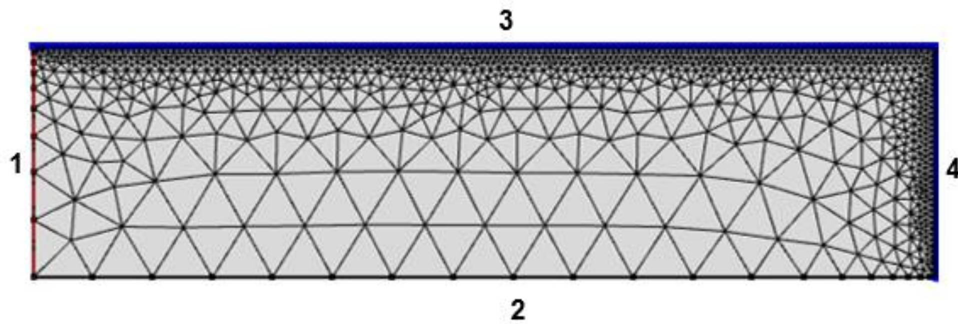
Figura 15: Definições de geometria no simulador.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Além disso, a Figura 16 mostra a geometria desenhada no software, a malha e os seus respectivos limites. Próximo aos limites 3 e 4 a malha é mais refinada devido a maior complexidade do fenômeno que ocorre nessas regiões da amostra. O simulador modelou para uma quantidade de 2103 elementos de domínio e 227 condições de fronteira para espessura de 8 mm.

Figura 16: Geometria desenhada no software para o estudo.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Por sua vez, as condições de contorno adotadas na simulação foram de transferência de massa e calor nulos na região de simetria (representado no centro da fatia da banana (ponto 1) da Figura 15) e condição de domínio do transporte por convecção na superfície da amostra.

Considerou-se que nos limites de fronteira 1 e 2 não há fluxos consideráveis de calor e massa, porém sabe-se que há fluxo de calor no limite 2 entre a placa de Petri e a amostra, no entanto, esse fluxo é bem menor do que nos limites 3 e 4, sendo desprezado durante a simulação computacional sem comprometer os resultados. A Tabela 6 mostra as condições de contorno consideradas na modelagem do processo.

Tabela 6: Condições de contorno adotadas para secagem da Banana Pacovan.

Contorno	Fluxo de calor	Fluxo de massa
1	$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; t \geq 0$	$\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; t \geq 0$
2	$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; t \geq 0$	$\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; t \geq 0$
3	$-K.\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R'} = h.(T_r - T_{inf})\ ; t \geq 0$	$D.\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=R'} = h_M.(C_e - C)\ ; t \geq 0$
4	$-K.\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R'} = h.(T_r - T_{inf})\ ; t \geq 0$	$D.\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=R'} = h_M.(C_e - C)\ ; t \geq 0$

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Sendo K a condutividade térmica, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_r a temperatura na superfície do produto, T_{inf} a temperatura de secagem, C_e a concentração de umidade de equilíbrio em, h_M o coeficiente de transferência de massa por convecção em m/s e *R´* o raio da fatia de banana. Para a condição inicial, admitiu-se que a temperatura inicial foi de 25°C e a concentração inicial da banana de 36761,11 mol.m^{-3} considerando a umidade determinada experimentalmente em base úmida de 0,65.

4.6 Análise dos Dados

Para realizar o estudo da secagem e umidade da fruta, algumas equações características devem ser aplicadas. Para a obtenção da umidade de base úmida do material, a Equação 20 foi utilizada.

$$\boldsymbol{U_{bu}} = \frac{\boldsymbol{m_{úmida}} - \boldsymbol{m_{seca}}}{\boldsymbol{m_{úmida}}} \qquad \text{Equação 20}$$

Em que U_{bu} é a umidade em base úmida, m_{seca} é a massa de sólidos secos e $m_{úmida}$ é a massa de sólidos com água.

Adicionalmente, por meio da pesagem periódica das amostras submetidas à secagem, pode-se basear o controle do processo de secagem. No intuito de se modelar as curvas de secagem, relações matemáticas semi-teóricas foram utilizadas como as de Newton e Page (BROOKER *et al*., 1992; McMINN, 2006).

A Tabela 7 mostra os modelos utilizados da cinética de secagem de materiais neste estudo.

Tabela 7: Principais modelos da cinética de secagem de materiais alimentícios.

Modelos	Equação
Newton	$RU = \exp(-k * t)$
Page	$RU = \exp(-k * t^n)$

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Em que RU é a razão de umidade, *t* é o tempo, *k* e *n* são parâmetros adimensionais para os modelos cinéticos de secagem mostrados.

Conforme destacado por Park *et al*.(2007), existem algumas hipóteses para que sejam válidos os modelos semi-teóricos. Deve-se admitir que a difusividade da água

é considerada constante, supondo-se que a secagem é realizada de forma isotérmica e que a difusividade da água não é fator dependente da quantidade de água no material. Além disso, considera-se que o material a ser seco possua forma regular simples e simétrica. De forma geral, relaciona-se o material à uma esfera ou placa e calcula-se a dimensão característica (ℓ e/ou r) e considera-se o mesmo volume para o produto e forma escolhida. Ademais, as dimensões do produto são admitidas como constantes. A dimensão mais relevante é calculada a partir do volume do material após ser seco. Além disso, assume-se um perfil linear de concentração de umidade do material. Considera-se que a superfície do material entra em equilíbrio com o ar de secagem imediatamente. Por fim, admite-se que o teor de umidade presente no material tende para a umidade de equilíbrio.

4.7 Validação dos dados gerados pela simulação

Sabendo-se que foram realizados 10 diferentes ensaios experimentais de secagem e de simulação realizada nas mesmas condições físicas do processo, os resultados obtidos devem ser analisados.

Assim com o intuito de equiparar os dados experimentais de concentração molar da água na fruta com os resultados do simulador e assim validar a utilização do *Comsol Multiphysics*, o Erro Relativo (P) e o Erro Médio Estimado (SE) foram estimados. Para avaliar o Erro Relativo (P), a Equação 21 foi utilizada.

$$P = \frac{100}{N}\sum\frac{Y - Y'}{Y}$$ Equação 21

Em que Y é o valor observado experimentalmente, Y´ é o valor calculado pelo modelo e N o número de observações.

Ademais, para calcular o Erro Médio estimado (SE), utilizou-se a Equação 22.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y')^2}{GLR}}$$ Equação 22

Em que GLR representa os graus de liberdade do modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estimativa da umidade

A Tabela 8 mostra a obtenção da umidade em base úmida para a Banana Pacovan, adotando-se a metodologia do Instituto Adolfo Lutz para estimativa da umidade de produtos alimentícios.

Tabela 8: Determinação da Umidade em Base Úmida da Banana Pacovan.

Ensaios	1	2	3	Média	Yuyama *et al.* (2001)
Massa Inicial (g)	9,05	8,56	8,02	8,54 $\pm$ 0,42	-/-
Massa Final (g)	3,35	2,91	2,72	2,99 $\pm$ 0,26	-/-
U_{bu} inicial (%)	62,98	66,00	66,01	64,99 $\pm$ 1,43	60,08

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Conforme verificado pela Tabela 8, a umidade em base úmida média obtida para os ensaios realizados foi 65%, próximo do valor determinado por Yuyama *et al.* (2001). Através da obtenção da umidade em base úmida, obteve-se a concentração molar inicial de água presente na fruta a partir da Equação 15, utilizando-se este valor para simulação do processo no Comsol.

Ademais, utilizou-se o analisador halogênio de umidade para verificação da umidade após o processo de secagem das amostras de cada experimento na estufa de circulação e renovação de ar Limatec. A Tabela 9 mostra o teor observado de umidade em base seca determinado para cada experimento.

Tabela 9: Obtenção da umidade em base seca após secagem das amostras.

Sem pré-tratamento osmótico		Com pré-tratamento osmótico	
Experimentos	X $\left(\frac{g\ H_2O}{g\ massa\ seca}\right)$	Experimentos	X $\left(\frac{g\ H_2O}{g\ massa\ seca}\right)$
1 (60°C/ 8 mm)	0,135	6 (60°C/ 8 mm)	0,105
2 (60°C/ 12 mm)	0,205	7 (60°C/ 12 mm)	0,162
3 (70°C/ 10 mm)	0,15	8 (70°C/ 10 mm)	0,120
4 (80°C/ 8 mm)	0,076	9 (80°C/ 8 mm)	0,071
5 (80°C/ 12 mm)	0,102	10 (80°C/ 12 mm)	0,076

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Observa-se que o teor de umidade em base seca apresentou-se menor para o processo submetido a tratamento osmótico. Verificou-se também que a menor umidade em base seca encontrada foi para condição de temperatura de 80°C e espessura de 8 mm com tratamento osmótico. Assim, entende-se que a desidratação osmótica propiciou remoção de água mais eficaz acoplado ao processo de secagem, além de a temperatura do ar interferir diretamente na dinâmica difusiva de água presente na fruta. Dessa forma, aumento da temperatura no sistema de secagem facilitou o processo difusivo e convectivo.

Além disso, o tratamento osmótico realizado em banho-maria durante 2 horas propiciou redução da umidade em base úmida inicial da fruta. A Tabela 10 mostra a umidade obtida após a desidratação osmótica nas diferentes condições experimentais adotadas, a redução de umidade em relação à umidade inicial da fruta e a concentração molar inicial adotada na simulação.

Tabela 10: Obtenção da Umidade em Base Úmida após tratamento osmótico.

Experimentos	$U_{bu}\left(\frac{g\ H_2O}{g\ massa\ inicial}\right)$	Redução da Umidade (%)	C_0 (mol/m^3)
6 (60°C/ 8 mm)	0,56	13,85	31671,11
7 (60°C/ 12 mm)	0,53	18,46	29974,44
8 (70°C/ 10 mm)	0,55	15,38	31105,56
9 (80°C/ 8 mm)	0,56	13,85	31671,11
10 (80°C/12 mm)	0,53	18,46	29974,44

Fonte: Próprio Autor, 2018.

A partir dos dados mostrados na Tabela 9, verifica-se que ocorreu uma redução de umidade entre 13,85 % e 18,46 % em relação a umidade da fruta em condições normais. A capacidade de desidratação osmótica da fruta está diretamente vinculada à concentração da solução saturada já que o transporte material ocorre mais eficazmente em maiores gradientes de concentração mássica. Um dos empecilhos no tratamento osmótico é que a capacidade desidratante possui limitações uma vez que após determinado tempo de processo as diferenças de concentração entre os limites interior e o exterior da banana praticamente é nulo, tornando-se resistência ao transporte material por difusão molecular da água na banana. Comparativamente, Silva, Bahia e Alves (2015) realizaram a desidratação osmótica de banana nas

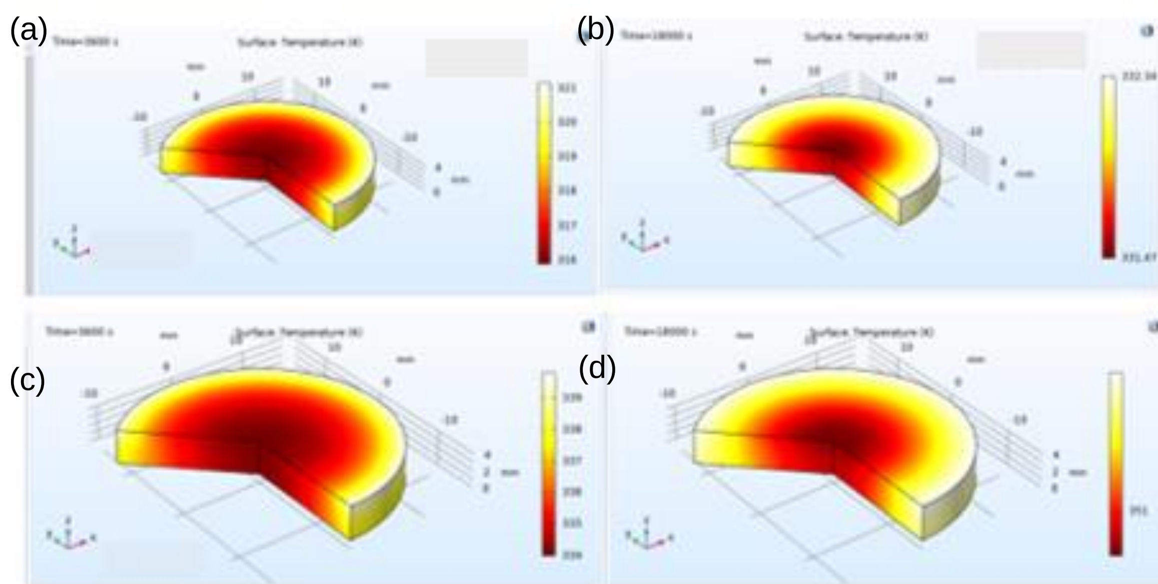
concentrações de 60% m/m e 70 % m/m, tendo obtido uma redução de umidade em torno de 25 % e 30 % respectivamente.

5.2 Estudo da influência da temperatura no processo

Um dos diferenciais proporcionados pelo simulador Comsol Multiphysics no estudo de processos químicos de transportes é a ampla possibilidade de análise do comportamento térmico e mássico do processo de secagem da Banana Pacovan nas condições experimentais.

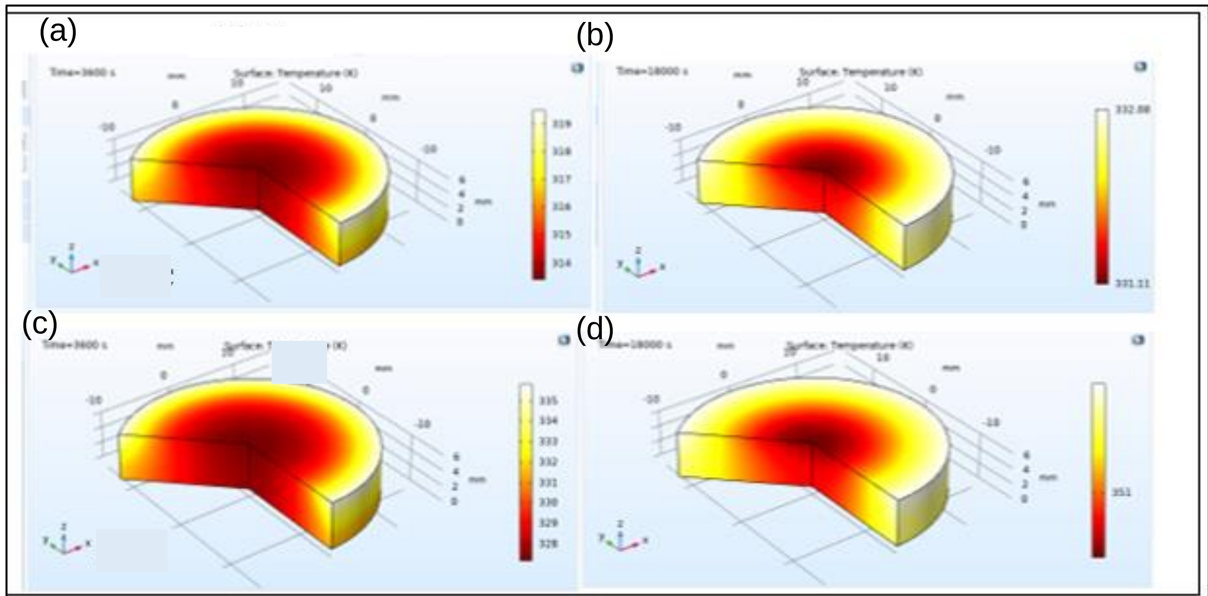
O software fornece gráficos em 2D ou 3D sobre o perfil de temperatura e concentração ao longo da fatia projetada para estudo. As Figuras 17 e 18 mostram o gráfico em 3D da distribuição de temperatura na fatia da fruta para os experimentos nas condições de temperatura do ar de secagem de 60°C e 80°C considerando as espessuras de 8 mm e 12 mm após 1 hora e 5 horas de secagem, respectivamente.

Figura 17: Distribuição de temperatura para a secagem de 60°C e 80°C em espessura de 8 mm.



(a). Para T=60°C após 1h de secagem; (b). Para T=60°C após 5h de secagem;
(c). Para T=80°C após 1h de secagem; (d). Para T=80°C após 1h de secagem
Fonte: Autoria Própria, 2018.

Figura 18: Distribuição de temperatura para secagem a 60°C e 80°C em espessura de 12 mm.

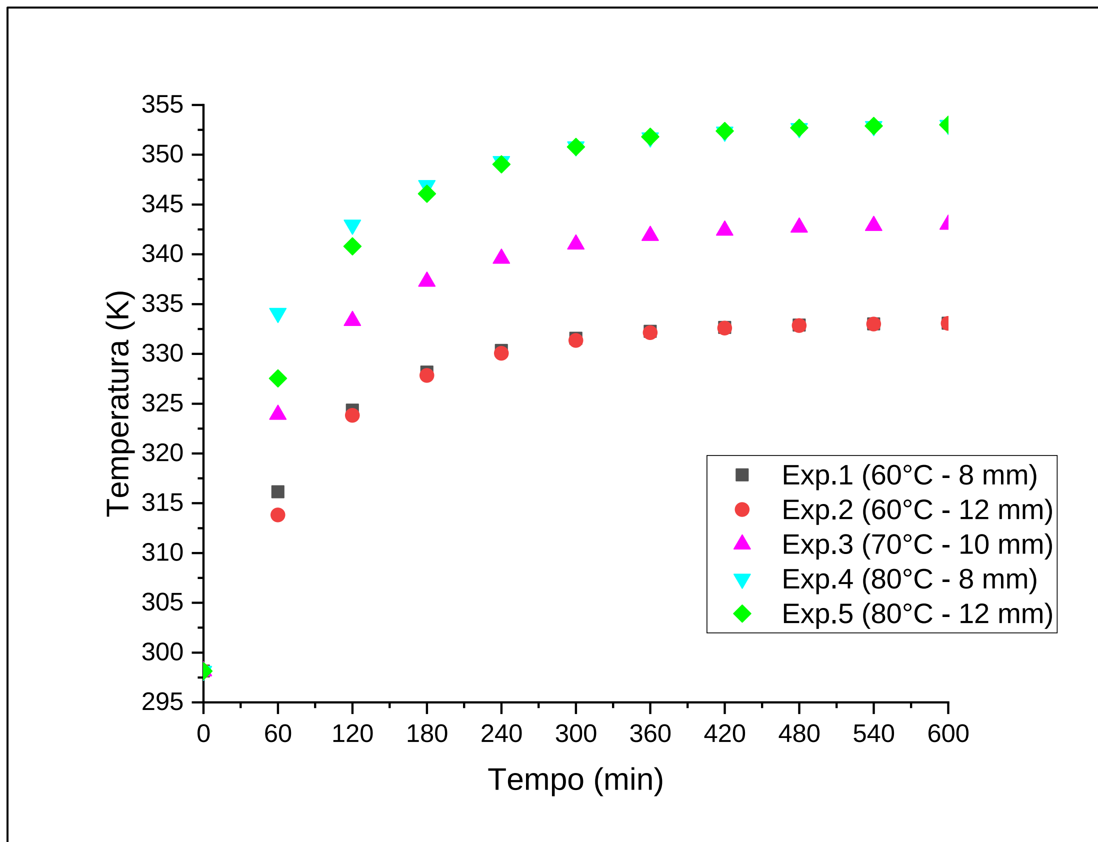


(a). Para T=60°C após 1h de secagem; (b). Para T=60°C após 5h de secagem;
(c). Para T=80°C após 1h de secagem; (d). Para T=80°C após 1h de secagem
Fonte: Autoria Própria, 2018.

Observando-se as Figuras 17 e 18, a menor temperatura se concentra na região simétrica da fatia uma vez que o fluxo de calor foi considerado nulo neste limite de fronteira. Ademais, após 5 horas de secagem, a distribuição térmica do corpo sólido está próxima da temperatura do ar aquecido sendo alcançado o equilíbrio térmico entre a superfície e o meio externo.

O estudo da evolução da temperatura no ponto central da fatia também é outro parâmetro relevante para avaliação do comportamento de transferência de calor no processo nas condições projetadas. Dessa forma, a Figura 19 mostra o gráfico do perfil de temperatura para o ponto central da fatia (Ponto 1 da Figura 15) nas diferentes condições de aquecimento do processo.

Figura 19: Perfil de Temperatiura do centro da fatia da banana sem tratamento osmótico.

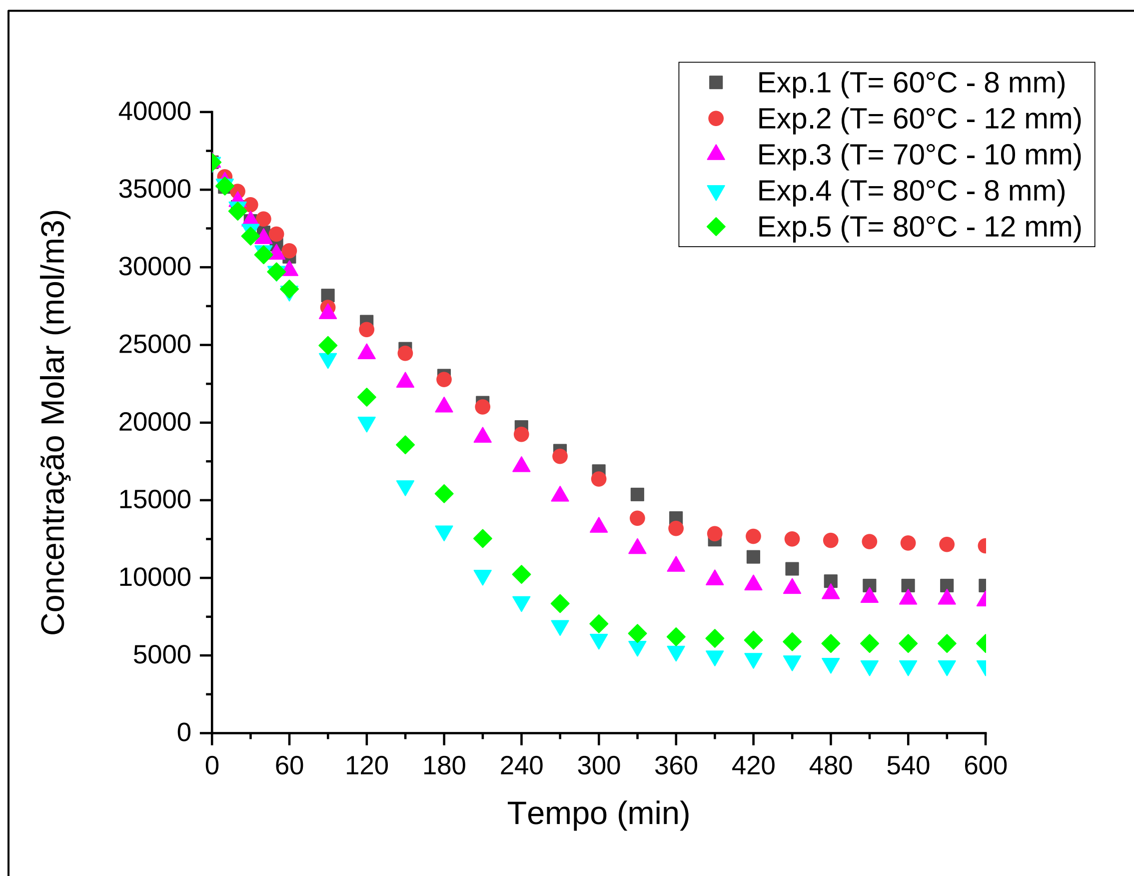


Fonte: Próprio Autor, 2018.

A partir do gráfico do perfil de temperatura, observa-se que a temperatura aumenta mais rapidamente para os ensaios realizados na maior temperatura de aquecimento estudada. Ademais, verifica-se que após 400 minutos de secagem, a temperatura se estabilizou para os experimentos analisados. Dessa forma, evidencia-se que a temperatura e a espessura interfere diretamente na capacidade de transporte térmico para o centro da fatia. No gráfico, observa-se que a temperatura se estabilizou rapidamente para os ensaios realizados na temperatura de 60°C, uma vez que a diferença da temperatura inicial da banana (25°C) e a temperatura estabilizada é menor, sendo assim mais favorável a estabilização da temperatura.

Adicionalmente, a Figura 20 mostra o gráfico comparativo do comportamento do perfil de concentração experimental pelo tempo para os experimentos de 1 a 5 com intuito de analisar a interferência da umidade na capacidade desidratante da fruta.

Figura 20: Perfil de concentração experimental por tempo para experimentos com variação de temperatura.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

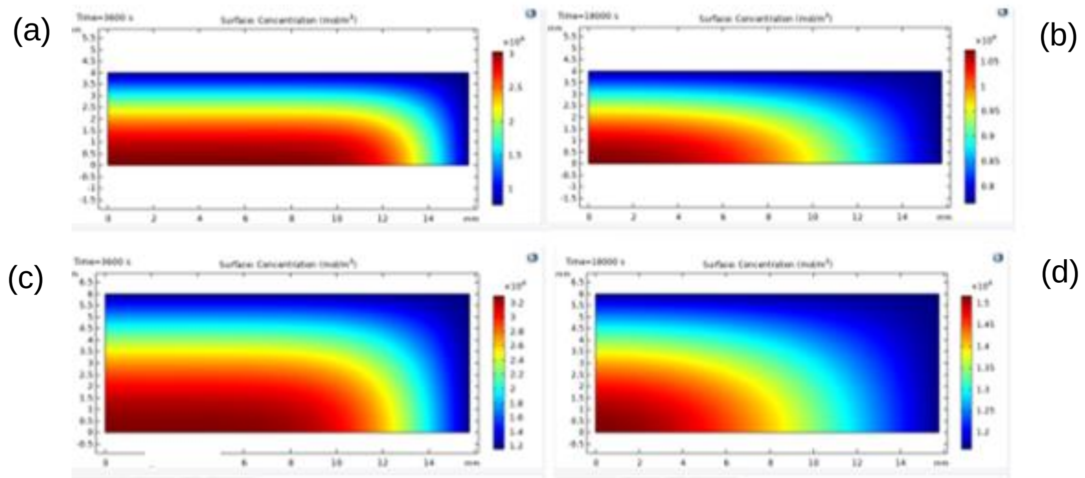
Observando-se a Figura 20, verifica-se que os experimentos realizados na temperatura de 80°C (Experimentos 4 e 5) alcançaram em menor tempo (para 360 minutos) a umidade de equilíbrio, além de apresentarem maior redução de umidade da fruta. Ademais, verifica-se que a umidade oscilou menos para o experimento 2 uma vez que foi a condição projetada de menor temperatura e maior espessura, sendo assim a de maior resistência a transporte material e térmico. Verificou-se também que o experimento 3 apresentou umidade de equilíbrio intermediária entre os ensaios realizados a 60°C e a 80°C.

5.3 Estudo da interferência da espessura no processo

Outro parâmetro que influencia na capacidade preditiva da secagem de produtos alimentícios é a espessura do material a ser seco. Considerando que foi adotado neste estudo as espessuras de 8 mm, 10 mm e 12 mm, deve-se analisar

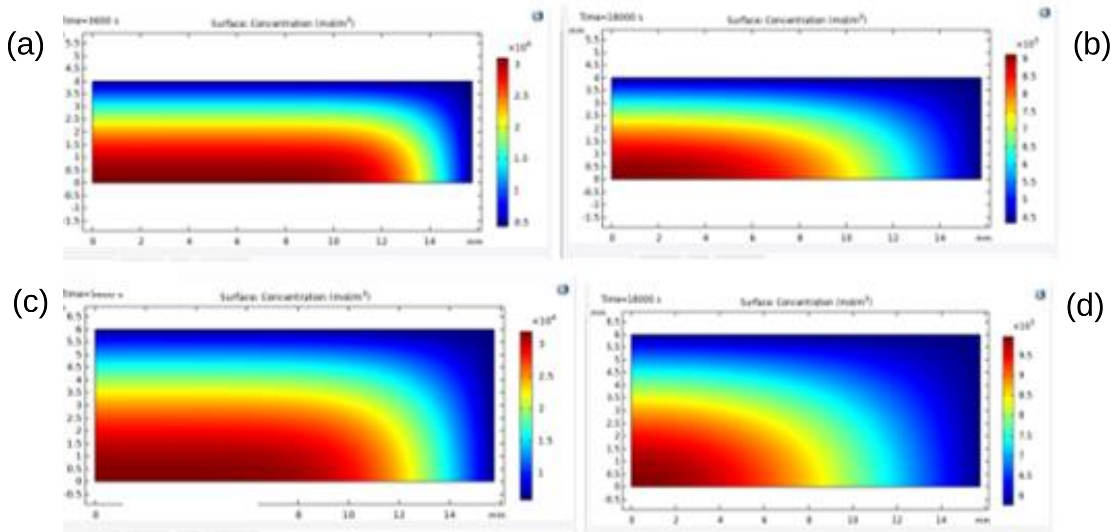
como esta variável influenciou nos resultados gerados pelo Comsol Multiphysics. Para isso, as Figuras 21 e 22 mostram os perfis de distribuição de concentração molar em 2D para as espessuras de 8 mm e 12 mm nas temperaturas de 60°C e 80°C, respectivamente, após 1 hora e 5 horas do início da secagem.

Figura 21: Distribuição de concentração molar para variação de espessura a 60°C.



a). Para L = 8 mm após 1h de secagem; (b). Para L = 8 mm após 5h de secagem;
(c). Para L = 12 mm após 1h de secagem; (d). Para L = 12 mm após 5h de secagem
Fonte: Próprio Autor, 2018.

Figura 22: Distribuição de concentraçao molar para variação de espessura a 80°C.



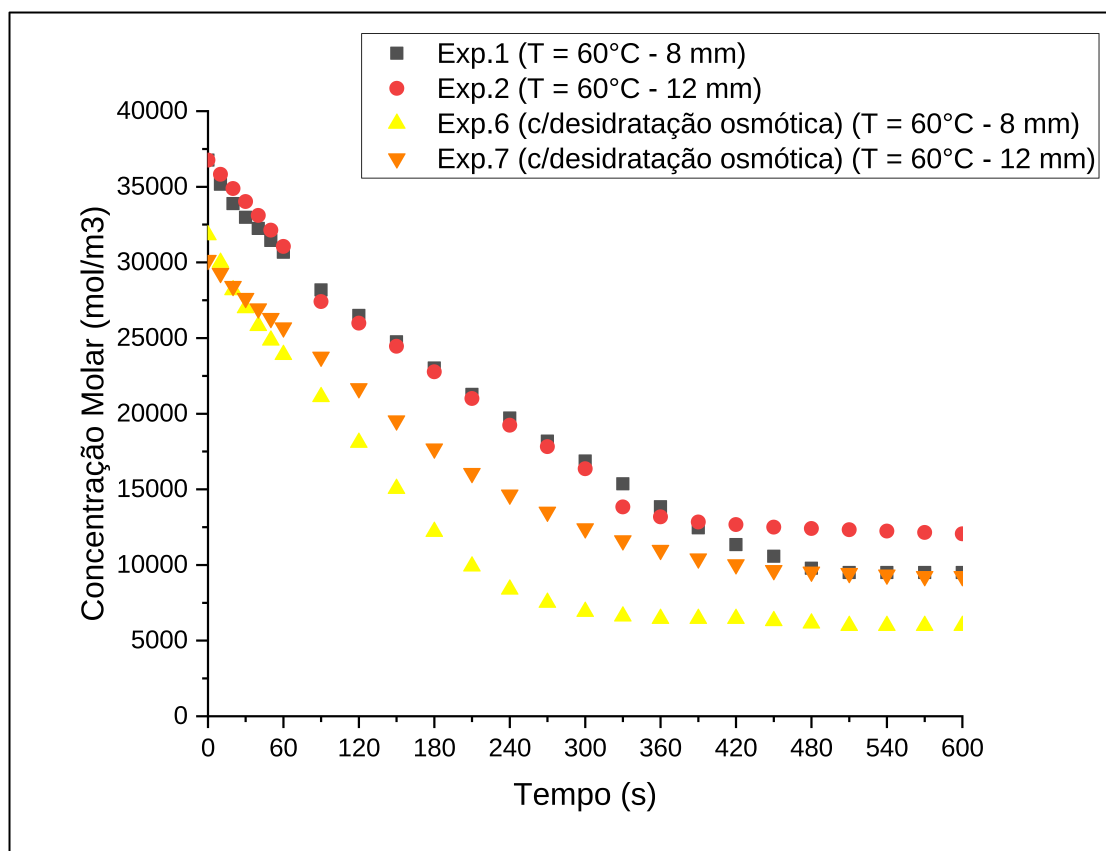
a). Para L = 8 mm após 1h de secagem; (b). Para L = 8 mm após 5h de secagem;
(c). Para L = 12 mm após 1h de secagem; (d). Para L = 12 mm após 5h de secagem
Fonte: Próprio Autor, 2018.

A partir das Figuras 21 e 22, observa-se que o perfil de concentração molar se distribui de forma heterogênea ao longo da fatia modelada, sendo que na extremidade direita ocorreu variação mais brusca de concentração. Observa-se também que houve influência da espessura no comportamento dos gráficos uma vez que a distribuição de concentração apresenta-se com valor superior para a menor espessura uma vez que a resistência à transferência térmica é menor. Ademais, verifica-se que a temperatura também interferiu de forma relevante no processo de difusão da água da banana no ar.

5.4 Estudo da interferência do tratamento osmótico no processo

O tratamento osmótico realizado previamente à secagem para os experimentos 6 a 10 influenciou na umidade inicial da fruta submetida ao processo de desidratação no secador de bandejas. A Figura 23 mostra o comparativo entre os experimentos de temperatura 60°C a 8 mm e 60°C a 12 mm com e sem tratamento osmótico prévio.

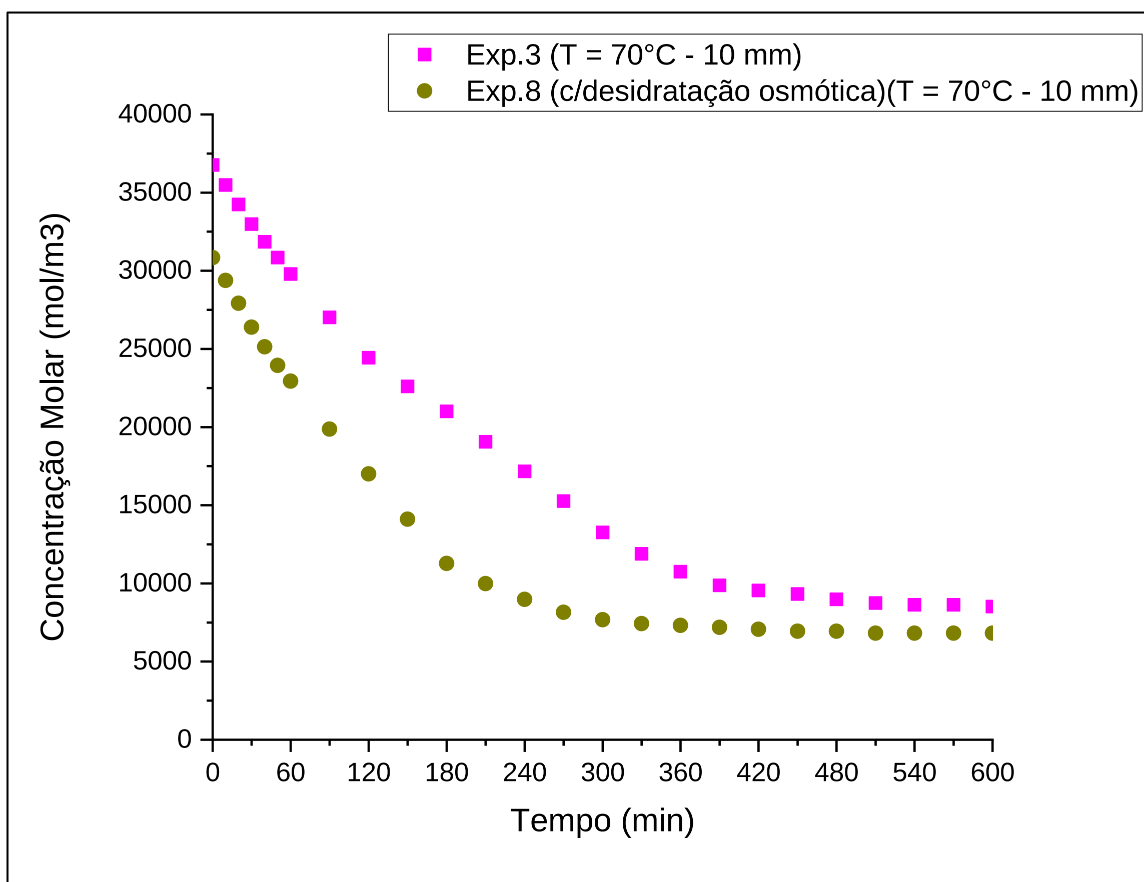
Figura 23: Gráfico comparativo do perfil de concentração experimental para temperatura de 60°C com espessuras variáveis.



Fonte:Próprio Autor, 2018.

Comparando-se os experimentos, a concentração de equilíbrio foi menor para os ensaios submetidos a desidratação osmótica. Ademais, o perfil de concentração apresentou maior diferença entre os experimentos 2 e 7 cuja espessura foi de 12 mm. A Figura 24 mostra o gráfico comparativo para os experimentos 3 e 8 com temperatura de 70°C e espessura de 10 mm.

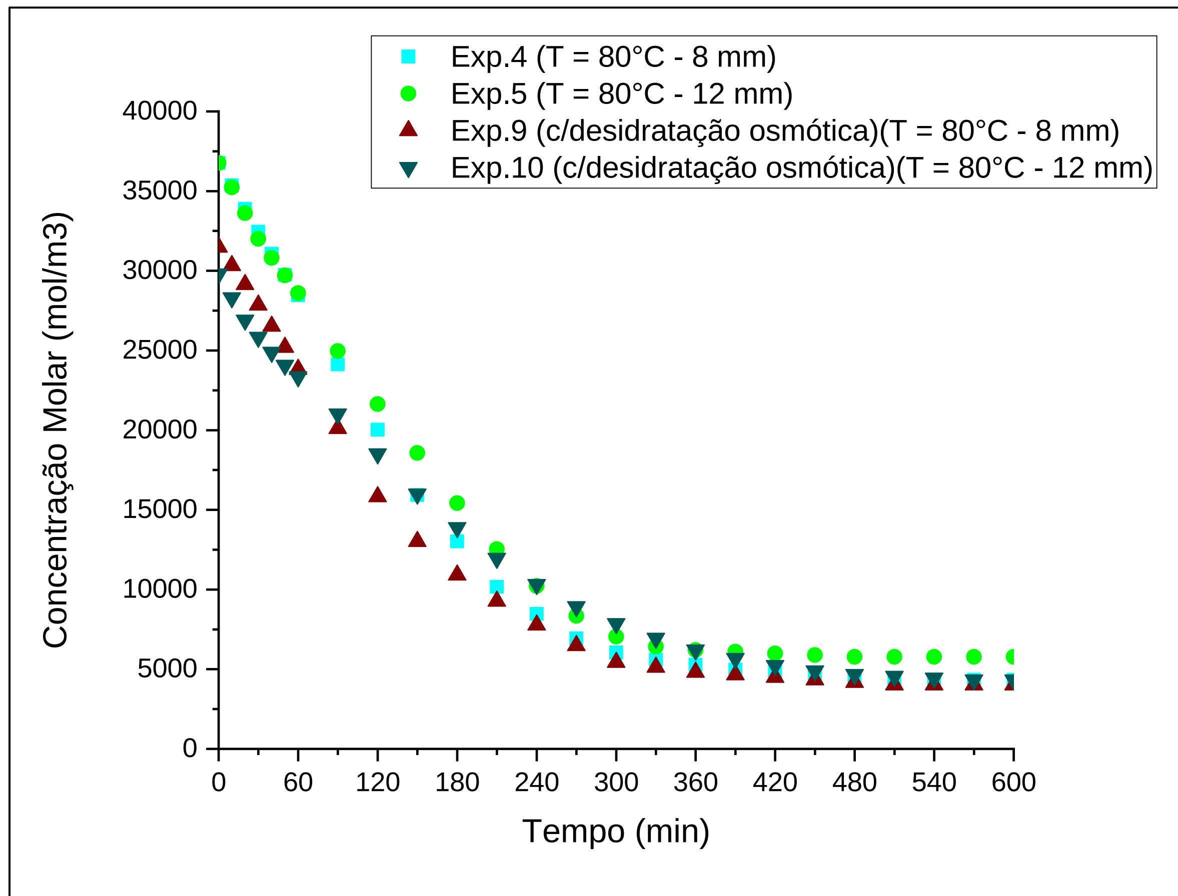
Figura 24: Gráfico comparativo do perfil de concentração experimental para temperatura de 70°C com espessuras de 10 mm.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Observando-se a Figura 24, para o experimento submetido a tratamento osmótico prévio, o tempo para estabilização da umidade da fruta diminuiu, além de apresentar no final do processo um percentual de água inferior. Além disso, a Figura 25 mostra o perfil de concentração experimental molar para a temperatura de 80°C com diferentes espessuras de 8 mm e 12 mm.

Figura 25: Gráfico comparativo do perfil de concentração experimental para temperatura de 80°C com espessuras variáveis.



Fonte:Próprio Autor, 2018.

A partir do gráfico, verifica-se que o aumento da temperatura de secagem diminuiu a interferência do tratamento osmótico na desidratação da Banana Pacovan, cabendo-se destacar que o tempo alcançado para a umidade de equilíbrio foi próximo entre os ensaios realizados. Com isso, entende-se que a efetividade do tratamento osmótico é maior quando é aplicada uma temperatura de ar de secagem menor conforme verificado nas Figuras 23 e 24.

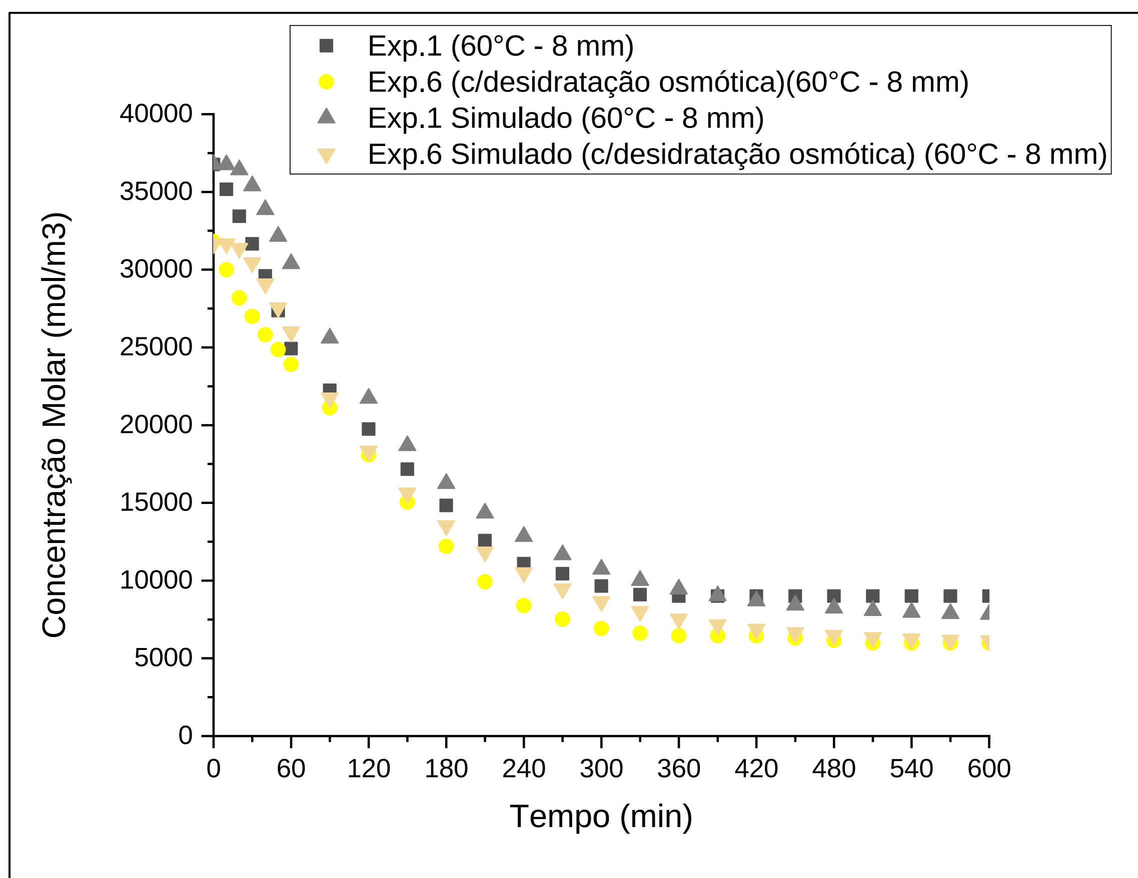
5.5 Comparativo dos dados experimentais e simulados de concentração molar

A partir dos ensaios experimentais de secagem em cada condição avaliada de temperatura e espessura e a obtenção dos dados simulados, torna-se possível a equiparação do comportamento experimental e simulado para cada ensaio realizado em relação ao perfil de concentração molar pelo tempo de secagem. Com isso, avalia-se se a simulação atingiu desvio experimental reduzido comparado com os dados

obtidos em escala laboratorial.

A Figura 26 mostra o gráfico comparativo dos dados experimentais e simulados de concentração molar na temperatura de 60°C com espessura de 8 mm.

Figura 26: Gráfico comparativo de concentração molar de água experimental e simulada para 60°C – 8 mm.

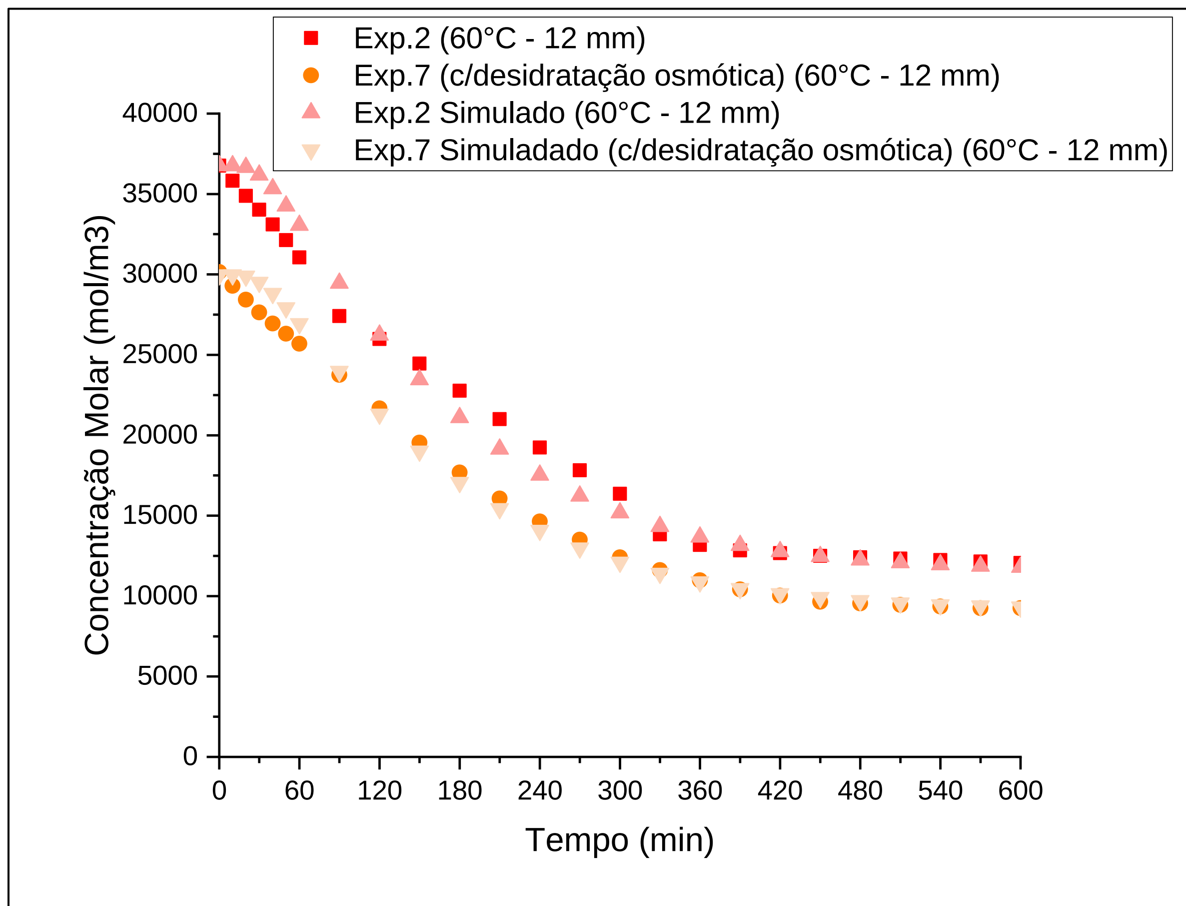


Fonte: Próprio Autor, 2018.

A partir da Figura 26, observa-se que houve maior distanciamento entre os dados experimentais e simulados para o ensaio 1, já que nas cinco horas iniciais de secagem a concentração molar experimental foi inferior aos dados gerados pelo simulador. Por sua vez, para o experimento 6, verifica-se que os valores experimentais são próximos dos simulados. Além disso, a concentração de equilíbrio foi inferior para o experimento 6 que foi precedido de tratamento osmótico. Assim, esta pré-etapa à secagem interferiu na umidade de equilíbrio e na cinètica da secagem.

A Figura 27 mostra os dados experimentais e simulados para os ensaios da temperatura de 60°C e 12 mm.

Figura 27: Gráfico comparativo de concentração molar de água experimental e simulada para 60°C – 12 mm.

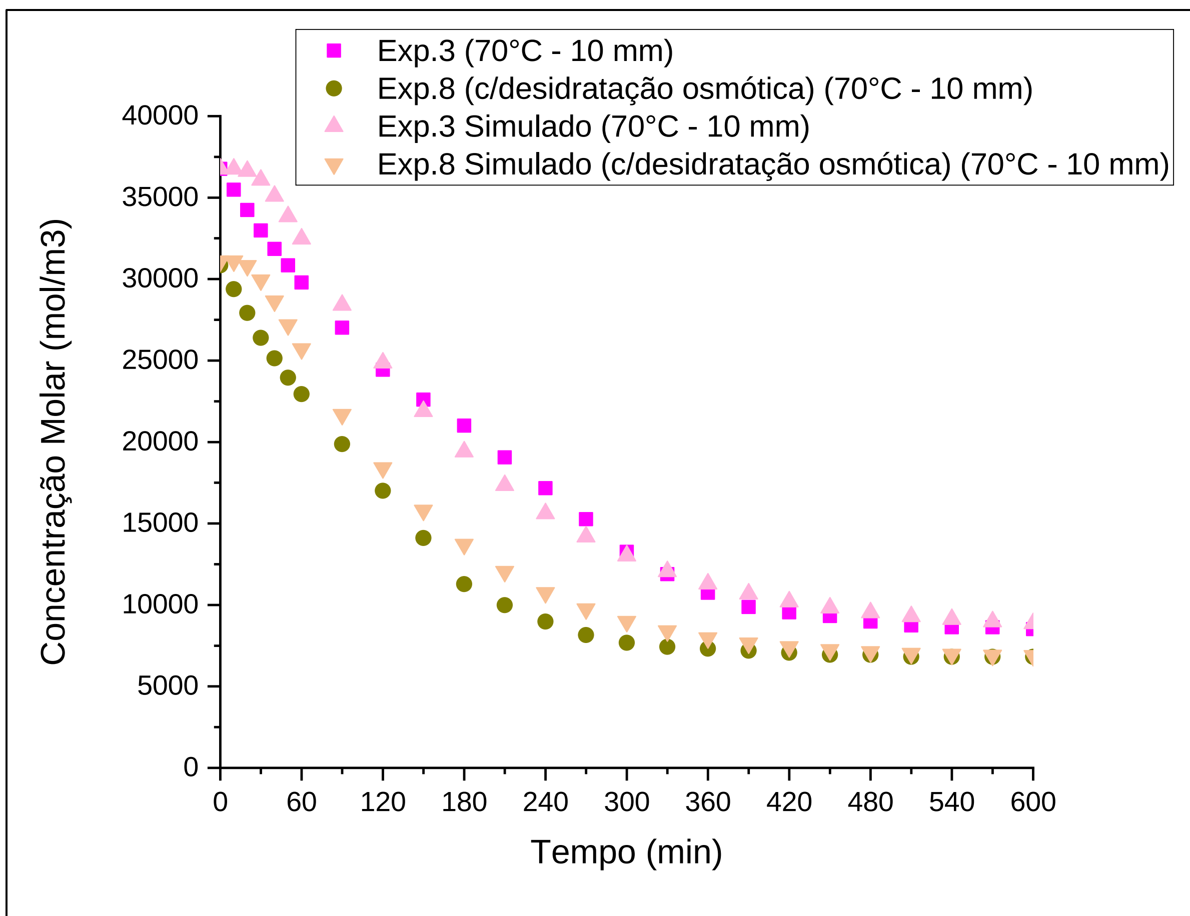


Fonte: Próprio Autor, 2018.

Os dados experimentais e simulados apresentaram maior discordância nos experimentos 2 e 7 sem desidratação osmótica, apresentando maior discrepância para o intervalo até 300 minutos. Observa-se também que o experimento subemtido a tratamento osmótico ocorreu maior proximidade entre os valores no invervalo posterior a 1 hora do início da secagem.

A Figura 28 mostra o comparativo gráfico do perfil de concentração para a temperatura de 70°C e 10 mm.

Figura 28: Gráfico comparativo de concentração molar de água experimental e simulada para 70°C e 10 mm.

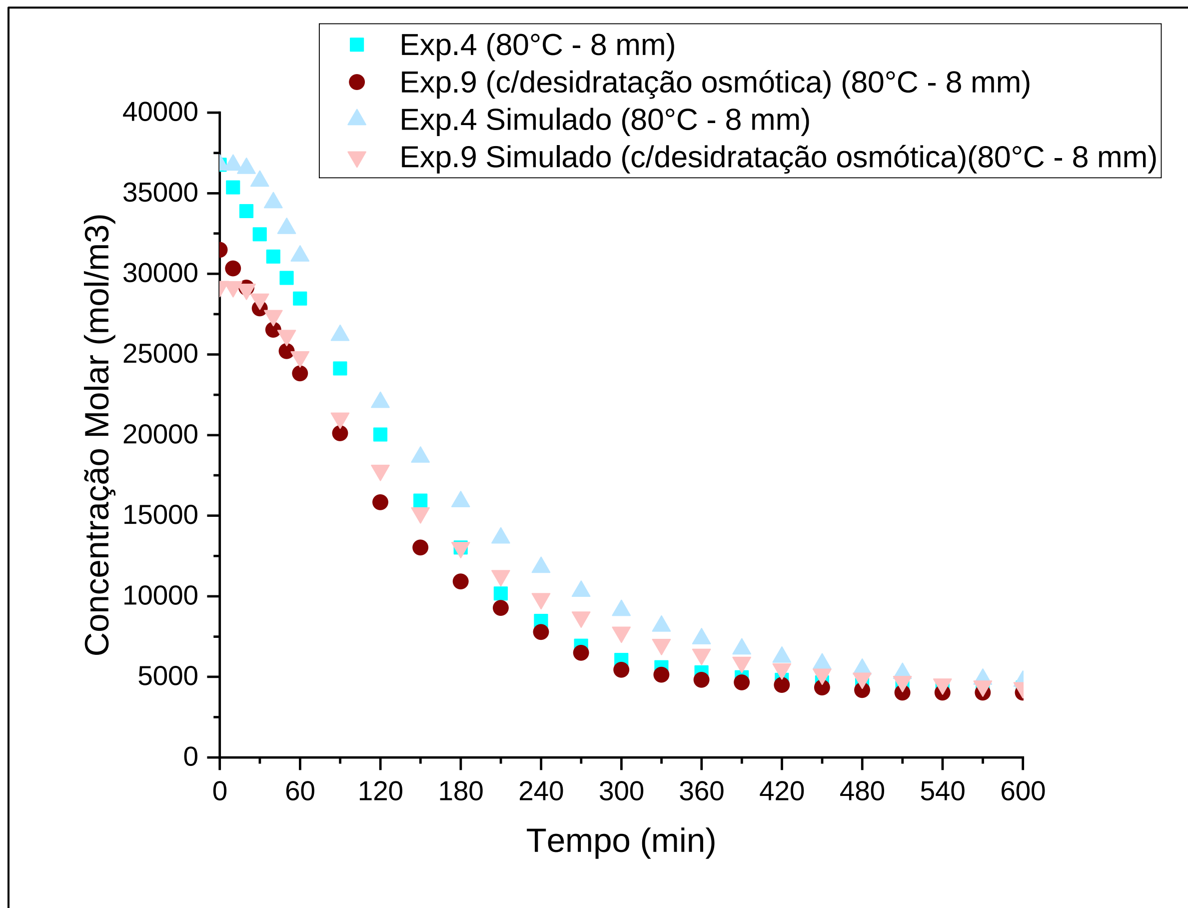


Fonte: Próprio autor, 2018.

A partir do comportamento gráfico da Figura 28, observa-se que houve maior proximidade para o ensaio experimental 3 sem tratamento osmótico, verificando também que a desidratação osmótica interferiu na concentração final alcançada para o experimento 8.

A Figura 29 mostra o comparativo gráfico da concentração molar de água na fruta entre os dados experimentais e simulados para temperatura de 80°C e espessura de 8 mm.

Figura 29: Gráfico comparativo de concentração molar de água experimental e simulada para 80°C e 8 mm.

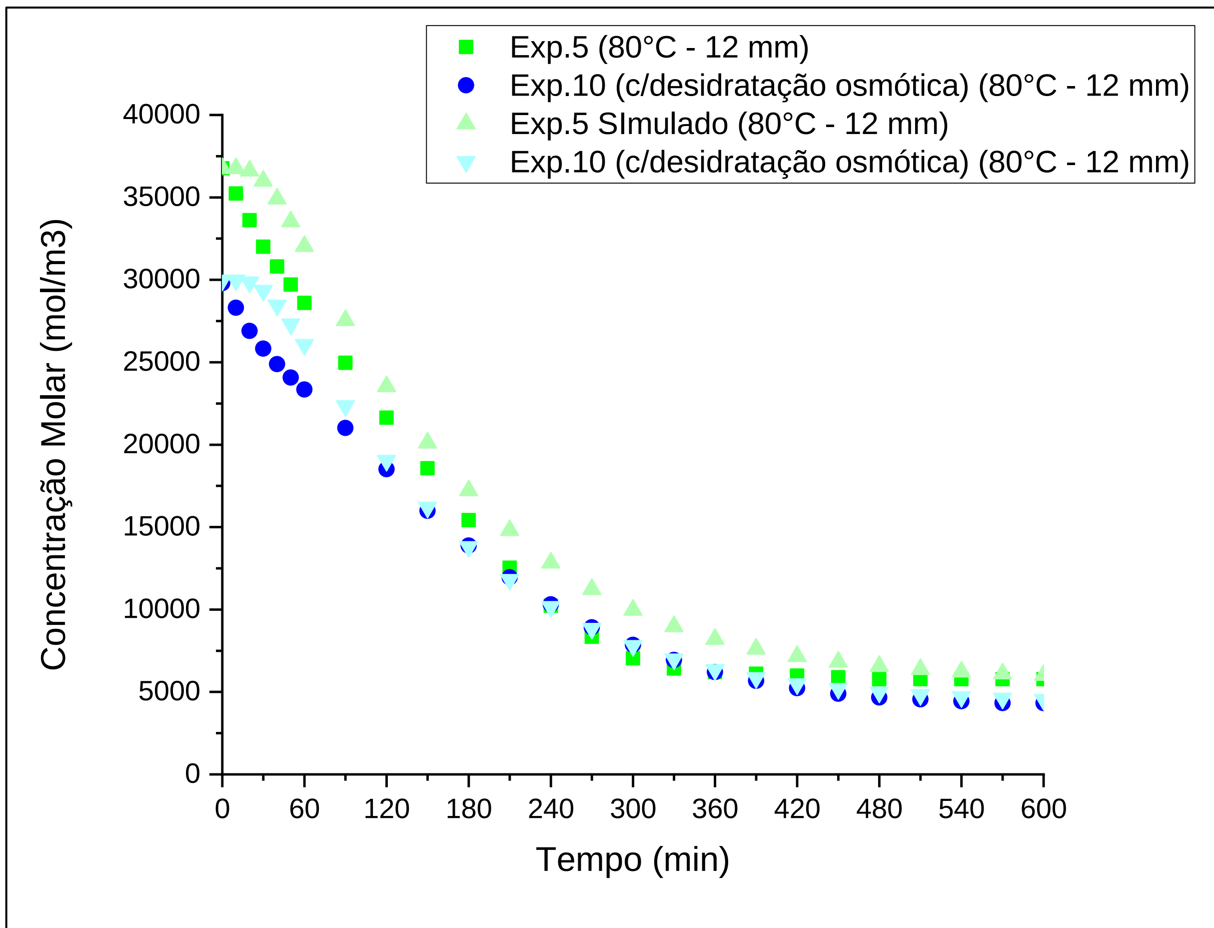


Fonte: Próprio autor, 2018.

A partir do gráfico da Figura 29, verifica-se que o experimento 4 sem tratamento prévio apresentou maior diferença entre os valores simulados e experimentais de concentração molar de água na banana entre 60 minutos e 420 minutos de secagem. Por sua vez, para os experimentos submetidos ao tratamento osmótico, ocorreu distanciamento entre os valores experimentais e simulados entre 2 horas e 7 horas de secagem. Observa-se também que a umidade de equilíbrio foi alcançada em tempo inferior para o ensaio com o tratamento osmótico.

Por fim, a Figura 30 mostra o perfil de concentração experimental e simulado para 80 °C e 12 mm.

Figura 30: Gráfico comparativo de concentração molar de água experimental e simulada para 80°C e 12 mm.



Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Figura 30, os dados simulados apresentaram diferença em relação aos dados experimentais especialmente nas primeiras horas da secagem convectiva. Com os dados fornecidos pelo simulador de concentração e os valores obtidos experimentalmente, a variabilidade experimental entre os termos para cada experimento pode ser verificada.

A Tabela 11 mostra o erro relativo mèdio para cada experimento realizado, considerando-se que foram realizadas 25 observações para cada ensaio.

Tabela 11: Determinação do Erro Relativo Médio para os experimentos realizados.

Experimentos	Erro Relativo Médio	Valor Médio	Desvio Padrão
1 (60°C – 8 mm)	9,30	17531,78	2306,76
2 (60°C – 12 mm)	4,34	21653,90	1314,13
3 (60°C – 8 mm)	5,89	19775,93	1556,83
4 (60°C – 12 mm)	21,48	16218,81	2375,42
5 (60°C – 8 mm)	15,91	17179,51	2346,12
6 (60°C – 12 mm)	10,33	14763,66	1695,67
7 (60°C – 8 mm)	2,35	17449,23	811,97
8 (60°C – 12 mm)	9,86	14858,45	1848,66
9 (60°C – 8 mm)	16,28	13574,02	1485,70
10 (60°C – 12 mm)	5,31	14145,94	1545,63

Fonte: Próprio Autor, 2018.

A partir dos dados fornecidos na Tabela 11, observa-se que o Erro Relativo Médio diminuiu conforme a espessura aumentou nas mesmas condições de temperatura (experimentos 1 e 4, 2 e 5, 6 e 9, 7 e 10). Ademais, observa-se que nas condições de menor temperatura (experimentos 2 e 7), o Erro Relativo Médio entre os dados experimentais e simulados é reduzido. Beluci *et al.* (2016) encontrou em seus estudos de modelagem no simulador um Erro Relativo Médio entre 11,5 % e 12,5 %, valor que a autora considerou aceitável devido a erros inerentes no procedimento experimental e na capacidade do simulador.

Adicionalmente, verifica-se que os maiores valores de Erro Relativo Médio foram encontrados para os experimentos 4 e 5, sendo o maior desvio encontrrado para a temperatura de 80°C e espessura de 8 mm. Analisando-se todos os experimentos realizados, verifica-se que a simulação no Comsol Multiphysics é mais adequada quando aplicada na condição de menor temperatura e maior espessura conforme também verificado por Davila (2016) e Beluci *et al.* (2016).

Como na modelagem do simulador não foi considerado o encolhimento da fatia de banana durante a secagem, os dados simulados se ajustaram melhor aos dados experimentais em espessuras maiores visto que nestas condições a redução volumétrica é menor. Davila (2016) disserta que os simuladores de Engenharia como o Comsol Multiphyscis possuem modelos físicos que tornam possível a modelagem da difusão e convecção considerando também o encolhimento da fruta durante a

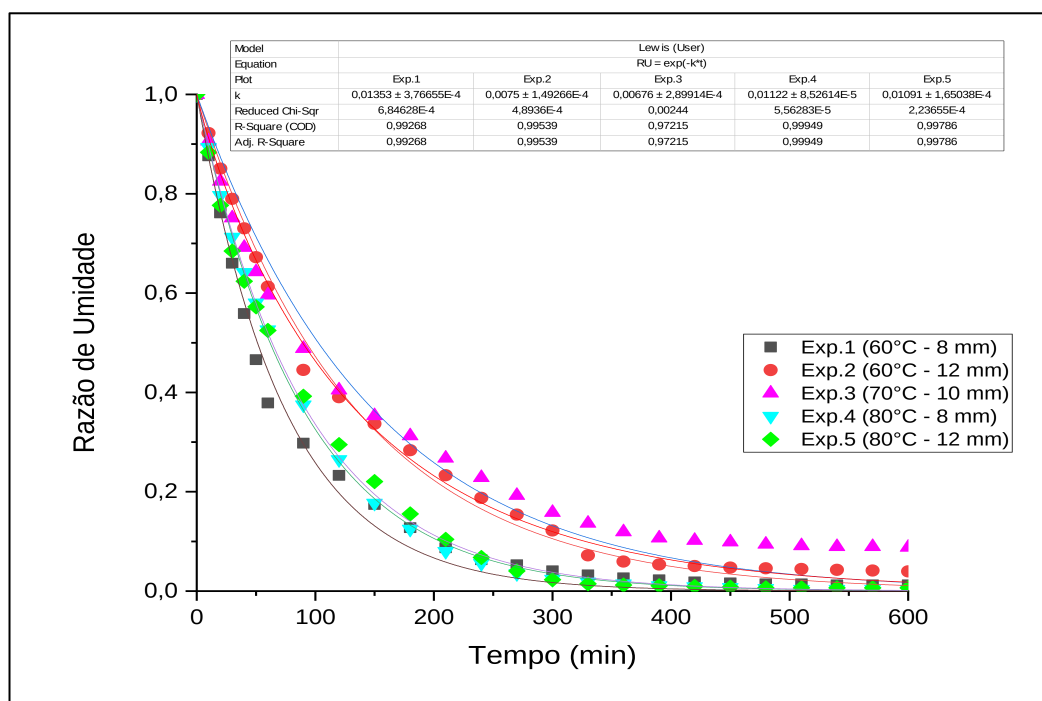
secagem.

Ademais, considera-se que o Comsol por ser um simulador que gera resultados a partir das definições do modelo, das condições iniciais e de contorno do processo, é sensível à aplicação de hipóteses simplificadoras que interferem na acuracidade da simulação. Uma das alternativas para resolução do método dos elementos finitos com convergência de dados e proximidade aos dados experimentais é a utilização do refinamento da malha nas regiões mais sensíveis do processo de difusão e convecção da fruta. Neste estudo, considerou-se que os limites 3 (superior) e 4 (direita) possuiam maior interferência na desidratação da fruta visto que a fronteira 1 é a região simétrica da fatia com maior restrição ao transporte material e térmico, enquanto o limite 2 é a região delimitada da fruta com a placa de Petri na bandeja. A partir disso, infere-se que a partir das hipóteses consideradas na modelagem deste estudo a simulação gera resultados mais próximos dos valores experimentais em maiores espessuras.

5.6 Modelos Cinéticos de Secagem

As Figuras 31 e 32 mostram o gráfico da razão de umidade pelo tempo nos experimentos 1 a 5 e 6 a 10, respectivamente, considerando-se o ajuste para o modelo cinético de secagem de Lewis.

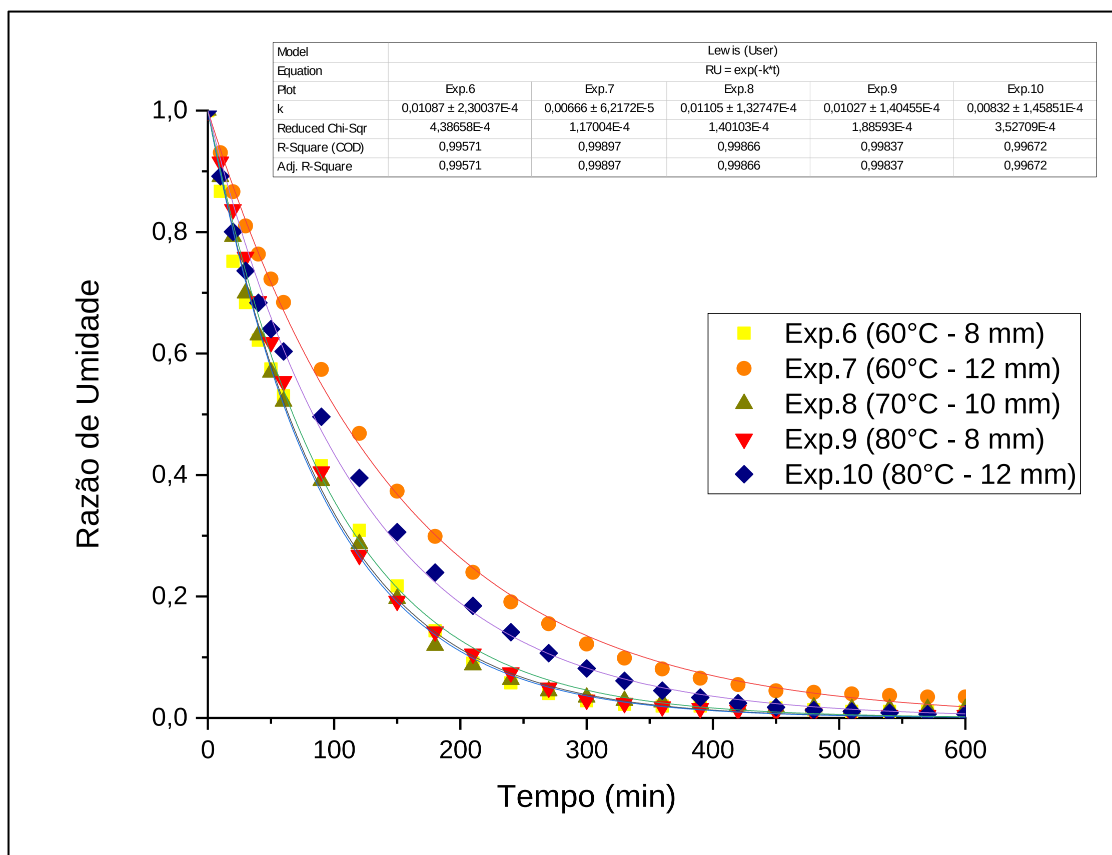
Figura 31: Modelo Cinético de Lewis ajustado aos experimentos 1-5.



Model	Lewis (User)				
Equation	RU = exp(-k*t)				
Plot	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5
k	0,01353 ± 3,76655E-4	0,0075 ± 1,49266E-4	0,00676 ± 2,89914E-4	0,01122 ± 8,52614E-5	0,01091 ± 1,65038E-4
Reduced Chi-Sqr	6,84628E-4	4,8936E-4	0,00244	5,56283E-5	2,23655E-4
R-Square (COD)	0,99268	0,99539	0,97215	0,99949	0,99786
Adj. R-Square	0,99268	0,99539	0,97215	0,99949	0,99786

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Figura 32: Modelo Cinético de Lewis ajustado aos experimentos 6-10 (com desidratação osmótica).

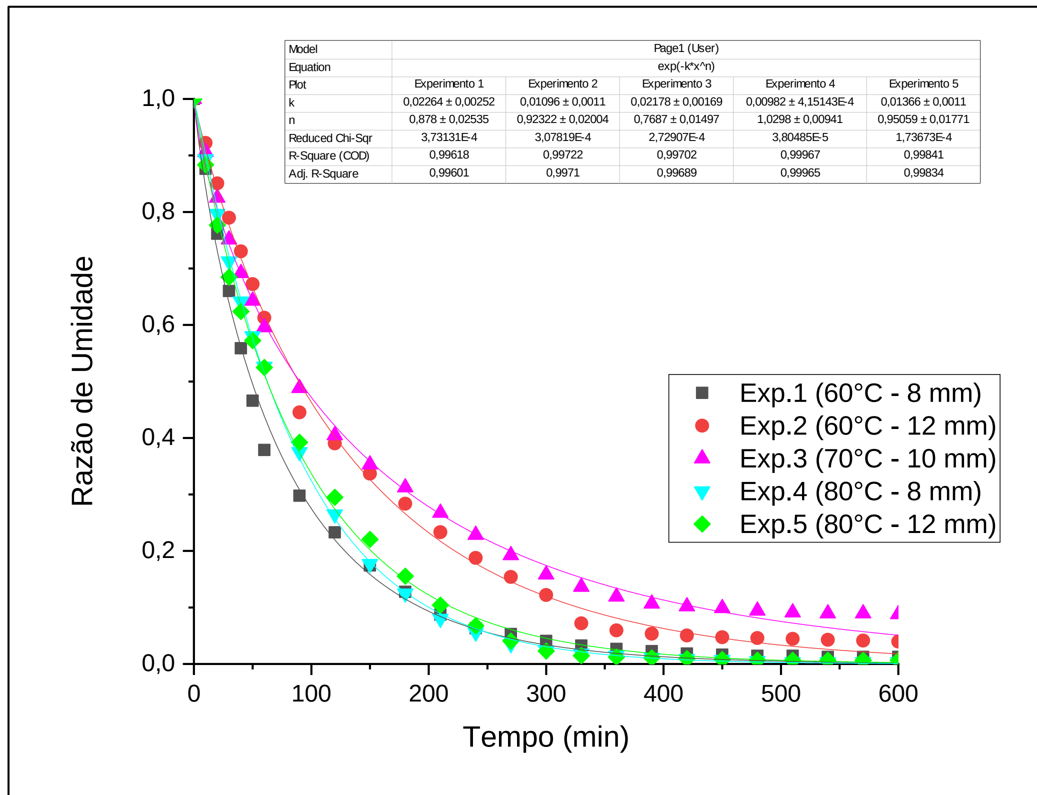


Fonte: Próprio Autor, 2018.

Analisando-se os ajustes realizados para os experimentos 1-10, o ensaio 3 apresentou menor fator de ajuste para o modelo considerado, sendo no entanto ainda considerado um fator aceitável. Por sua vez, o experimento 4 apresentou melhor correlação ao modelo, tendo fator R^2 próximo da unidade.

Ademais, as Figuras 33 e 34 mostram o ajuste para o modelo cinético de secagem de Page dos experimentos 1 a 5 e 6 a 10, respectivamente.

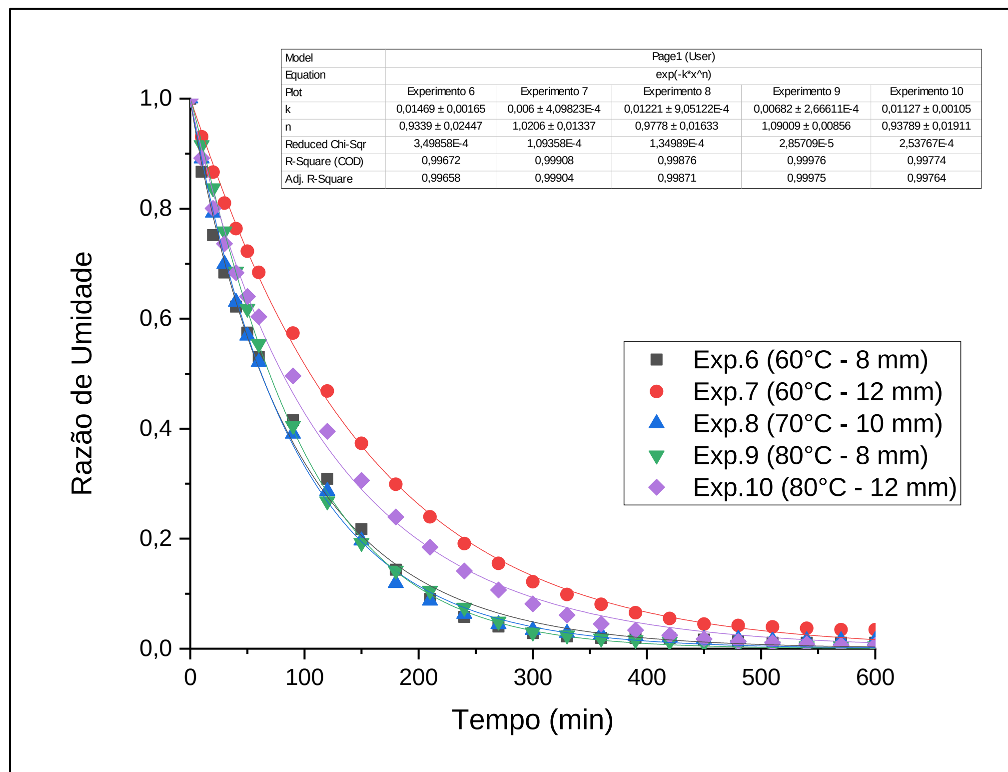
Figura 33: Modelo Cinético de secagem de Page para os experimentos 1-5.



Model	Page1 (User)				
Equation	exp(-k*x^n)				
Plot	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5
k	0,02264 ± 0,00252	0,01096 ± 0,0011	0,02178 ± 0,00169	0,00982 ± 4,15143E-4	0,01366 ± 0,0011
n	0,878 ± 0,02535	0,92322 ± 0,02004	0,7687 ± 0,01497	1,0298 ± 0,00941	0,95059 ± 0,01771
Reduced Chi-Sqr	3,73131E-4	3,07819E-4	2,72907E-4	3,80485E-5	1,73673E-4
R-Square (COD)	0,99618	0,99722	0,99702	0,99967	0,99841
Adj. R-Square	0,99601	0,9971	0,99689	0,99965	0,99834

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Figura 34: Modelo Cinético de secagem de Page para os experimentos 6-10 (com desidratação osmótica).



Model	Page1 (User)				
Equation	exp(-k*x^n)				
Plot	Experimento 6	Experimento 7	Experimento 8	Experimento 9	Experimento 10
k	0,01469 ± 0,00165	0,006 ± 4,09823E-4	0,01221 ± 9,05122E-4	0,00682 ± 2,66611E-4	0,01127 ± 0,00105
n	0,9339 ± 0,02447	1,0206 ± 0,01337	0,9778 ± 0,01633	1,09009 ± 0,00856	0,93789 ± 0,01911
Reduced Chi-Sqr	3,49858E-4	1,09358E-4	1,34989E-4	2,85709E-5	2,53767E-4
R-Square (COD)	0,99672	0,99908	0,99876	0,99976	0,99774
Adj. R-Square	0,99658	0,99904	0,99871	0,99975	0,99764

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Observando-se as Figuras 33 e 34, verifica-se que o modelo de Page se adequou para todos os ensaios realizados tendo menor fator de ajuste para os experimentos 1 e 6. A Tabela 12 sintetiza a obtenção do parâmetro de secagem k e a estimativa dos fatores de ajuste R^2 e π^2 para os modelos de Lewis e Page.

Tabela 12: Obtenção da equação do modelo de Lewis e Page, da variável K e fator de ajuste dos dados experimentais.

Modelos	Experimentos	k	n	R^2	π^2
Lewis	1	$1,353 \times 10^{-4}$	-	0,993	$6,85 \times 10^{-4}$
	2	$7,500 \times 10^{-3}$	-	0,995	$4,89 \times 10^{-4}$
	3	$6,760 \times 10^{-3}$	-	0,972	$2,44 \times 10^{-3}$
	4	$1,122 \times 10^{-2}$	-	0,999	$5,56 \times 10^{-5}$
	5	$1,091 \times 10^{-2}$	-	0,998	$6,24 \times 10^{-4}$
	6	$1,087 \times 10^{-2}$	-	0,996	$4,39 \times 10^{-4}$
	7	$6,660 \times 10^{-3}$	-	0,999	$1,17 \times 10^{-4}$
	8	$1,105 \times 10^{-2}$	-	0,997	$1,85 \times 10^{-4}$
	9	$1,030 \times 10^{-2}$	-	0,998	$6,85 \times 10^{-4}$
	10	$1,027 \times 10^{-2}$	-	0,997	$1,90 \times 10^{-4}$
Page	1	$2,264 \times 10^{-2}$	0,878	0,996	$3,73 \times 10^{-4}$
	2	$1,096 \times 10^{-2}$	0,923	0,997	$3,08 \times 10^{-4}$
	3	$2,178 \times 10^{-2}$	0,769	0,997	$2,73 \times 10^{-4}$
	4	$9,820 \times 10^{-3}$	1,030	0,999	$3,80 \times 10^{-5}$
	5	$1,366 \times 10^{-2}$	0,951	0,998	$1,74 \times 10^{-4}$
	6	$1,469 \times 10^{-2}$	0,934	0,997	$3,50 \times 10^{-4}$
	7	$6,000 \times 10^{-3}$	1,021	0,999	$1,09 \times 10^{-4}$
	8	$1,221 \times 10^{-2}$	0,978	0,999	$1,35 \times 10^{-4}$
	9	$6,820 \times 10^{-3}$	1,090	0,999	$2,86 \times 10^{-5}$
	10	$1,127 \times 10^{-2}$	0,938	0,998	$2,54 \times 10^{-4}$

Fonte: Próprio Autor, 2018.

A partir da Tabela 12, verifica-se que os ensaios 3 e 1 apresentaram fator de ajuste mais distante para os modelos de Lewis e Page, respectivamente, cujos fatores R^2 foram de 0,972 e 0,996. No entanto, os ensaios em geral foram melhor descritos para o modelo de Page.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da simulação da secagem convectiva da Banana Pacovan (*Musa paradisíaca*) acoplado às análises experimentais foi relevante uma vez que o conhecimento adquirido ao longo da formação acadêmica foi utilizado especialmente nas áreas que tangem fenômenos de transportes térmicos e de massa e simulação de processos.

A partir da comparação dos dados experimentais e simulados nos gráficos de concentração molar de água por tempo, observou-se que o erro relativo médio foi reduzido para a maioria dos ensaios experimentais realizados. O menor erro relativo médio foi encontrado para as condições experimentais de temperatura de 60°C com espessura de 12 mm cujo valor foi de 2,35%. Por sua vez, o maior erro relativo médio encontrado foi na temperatura de 80°C com espessura de 8 mm cujo valor foi de 21,48 %. Com isso, os dados mais consistentes foram encontrados na maior espessura já que as hipóteses consideradas no simulador não admitiram o encolhimento da fruta durante a secagem.

Ademais, destaca-se que a menor umidade final encontrada para os ensaios experimentais realizados foi para a fruta de espessura de 8 mm na temperatura de 80 ºC, ratificando que a transferência térmica foi mais eficiente em espessuras menores e temperaturas maiores. Assim, o aumento do gradiente térmico interferiu diretamente no processo de transporte de calor no material assim como a diminuição da espessura otimizou a taxa de transporte material e energético.

Adicionalmente, os dados experimentais para o modelo cinético de secagem de Lewis e Page, obtendo-se fatores de ajuste próximos da unidade para a maioria dos ensaios realizados com exceção do experimento 3 cujo fator R^2 foi 0,972 no modelo de Lewis e o ensaio 1 para o modelo de Page cujo fator R^2 foi de 0,996. O modelo de Page assim possuiu melhor ajuste aos dados experimentais. Além disso, o parâmetro do modelo de secagem k aumentou conforme a temperatura aumentava e a espessura diminuia.

Outrossim, a secagem de frutas é uma excelente alternativa para a preservação de alimentos, aumento de seu tempo de prateleira, diminuição dos custos com transporte e armazenamento, uma vez que os frutos secos são mais leves e menos volumosos. Logo a secagem da Banana Pacovan, uma fruta muito consumida regional e nacionalmente, com a utilização do simulador Comsol Multiphysics pode se tornar objeto de pesquisa a respeito da capacidade preditiva do simulador.

Ademais, a desidratação de frutas comestíveis traz um valor agregado significativo para a indústria alimentícia e produtores locais já que frutos secos possuem maior tempo de prateleira em relação aos frutos *in natura.*

Por fim, existem inúmeras possibilidades de análises da simulação de secagem de frutas, sendo extremamente interessante para prever diversas análises de transporte material e de energia presentes no cenário de pesquisas de Engenharia Química.

Como possíveis sugestões para melhoria deste trabalho para outros autores, pode-se citar o acoplamento da geometria em 3 dimensões visto que é possível realizar uma análise mais precisa da difusão molecular da água na fruta e do encolhimento volumétrico da fruta durante a secagem. Ademais, pode-se também acoplar outros modelos físicos de estudo do processo como mecanismos de transporte de secagem em meios porosos, lei de Darcy, teoria de condensação e evaporação, entre outros.

Dessa forma, existem diversas alternativas para continuidade dos estudos do simulador Comsol Multiphysics como software computacional para predição de comportamentos de fenômenos físico-químicos comuns na Engenharia Química como a secagem, a convecção e a difusão.

7 APÊNDICES

7.1 Dados Experimentais de concentração molar da secagem não precedida do pré-tratamento osmótico

Tabela 7.1: Dados de concentração molar por tempo para cada experimento realizado.

Tempo (min)	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5
	60°C/8 mm	60°C/12 mm	70°C/10 mm	80°C/8 mm	80°C/12 mm
0	36761,11	36758,62	36758,27	36761,11	36758,76
10	35164,62	35827,21	35483,35	35356,03	35234,57
20	33433,84	34887,74	34242,12	33888,15	33611,87
30	31660,70	34018,42	32976,07	32443,34	32003,45
40	29593,02	33100,94	31852,40	31071,69	30809,02
50	27362,31	32132,16	30839,76	29747,33	29706,01
60	24915,31	31050,99	29784,29	28464,43	28603,04
90	22239,61	27412,21	27014,01	24130,37	24969,95
120	19749,56	25984,78	24431,78	20025,04	21635,40
150	17158,85	24456,24	22592,97	15927,34	18572,23
180	14829,48	22766,80	20999,06	13017,90	15423,35
210	12567,90	21002,51	19049,27	10170,75	12534,22
240	11089,32	19230,77	17158,96	8467,36	10221,81
270	10443,50	17815,00	15259,33	6925,17	8345,95
300	9643,87	16359,63	13262,59	6041,54	7042,99
330	9095,19	13837,83	11888,21	5587,82	6417,57
360	8675,19	13178,10	10745,56	5280,79	6205,57
390	8391,03	12840,53	9877,12	4970,03	6098,89
420	8103,48	12669,77	9542,91	4813,24	5991,77
450	7958,42	12497,67	9317,43	4655,49	5884,18
480	7812,48	12411,11	8975,12	4496,77	5776,14
510	7812,48	12324,21	8744,15	4337,08	5776,14
540	7812,48	12236,97	8627,82	4337,08	5776,14
570	7665,66	12149,39	8627,82	4337,08	5776,14
600	7665,66	12061,45	8510,92	4337,08	5776,14

Fonte: Autoria Própria, 2018.

7.2 Dados Experimentais de concentração molar com pré-tratamento osmótico

Tabela 7.2: Dados de concentração molar por tempo para cada experimento realizado.

Tempo (min)	Exp.6	Exp.7	Exp.8	Exp.9	Exp.10
	60°C/8 mm	60°C/12 mm	70°C/10 mm	80°C/8 mm	80°C/12 mm
0	31812,50	30151,89	30839,76	31484,54	29796,52
10	29990,18	29286,72	29385,49	30325,63	28304,61
20	28178,90	28433,50	27924,31	29142,96	26897,34
30	26990,08	27637,25	26389,71	27848,60	25825,82
40	25814,18	26951,44	25138,81	26532,24	24885,95
50	24853,52	26313,94	23942,48	25205,24	24065,04
60	23896,71	25690,83	22940,71	23818,59	23340,01
90	21115,72	23753,33	19873,43	20103,26	21009,97
120	18092,42	21664,99	17000,74	15830,14	18511,55
150	15042,91	19538,22	14102,32	13017,90	15983,93
180	12207,35	17680,95	11272,11	10916,89	13875,37
210	9913,47	16069,93	9987,47	9268,83	11957,16
240	8391,03	14634,81	8975,12	7778,41	10311,78
270	7517,96	13510,49	8156,78	6487,25	8924,47
300	6918,11	12411,11	7676,40	5434,77	7853,01
330	6612,65	11616,51	7432,61	5125,88	6939,84
360	6458,50	10978,43	7309,81	4813,24	6205,57
390	6458,50	10416,91	7186,38	4655,49	5667,64
420	6458,50	10034,81	7062,34	4496,77	5228,95
450	6303,41	9646,32	6937,67	4337,08	4894,94
480	6147,34	9548,19	6937,67	4176,41	4669,84
510	5990,31	9449,64	6812,37	4014,75	4556,55
540	5990,31	9350,68	6812,37	4014,75	4442,77
570	5990,31	9251,30	6812,37	4014,75	4328,48
600	5990,31	9251,30	6812,37	4014,75	4328,48

7.3 Dados simulados para perfil de temperatura do centro da fatia de banana para experimentos sem desidratação osmótica

Tabela 7.3: Dados Simulados do Perfil de temperatura do centro da fatia para experimentos sem pré-tratamento osmótico

Tempo (min)	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 4	Experimento 5
0	298,15	298,15	298,15	298,15
60	316,14	313,81	334,10	327,54
120	324,35	323,82	342,96	340,81
180	328,17	327,83	346,94	346,09
240	330,34	330,05	349,35	349,04
300	331,57	331,34	350,82	350,79
360	332,26	332,13	351,73	351,80
420	332,66	332,59	352,29	352,38
480	332,89	332,84	352,65	352,71
540	333,01	332,98	352,86	352,90
600	333,08	333,06	352,98	353,01

Fonte: Autoria Própria, 2018.

7.4 Dados simulados para perfil de temperatura do centro da fatia de banana para experimentos com desidratação osmótica

Tabela 7.4: Dados Simulados do Perfil de temperatura do centro da fatia para experimentos sem pré-tratamento osmótico.

Tempo (min)	Experimento 6	Experimento 7	Experimento 9	Experimento 10
0	298,15	298,15	298,15	298,15
60	322,58	316,44	337,70	331,05
120	328,32	325,21	345,03	342,70
180	330,62	328,59	348,24	347,20
240	331,83	330,52	350,14	349,69
300	332,45	331,64	351,30	351,17
360	332,77	332,29	352,02	352,02
420	332,94	332,65	352,48	352,50
480	333,04	332,87	352,75	352,78
540	333,09	332,99	352,92	352,94
600	333,12	333,07	353,02	353,03

Fonte: Autoria Própria, 2018.

7.5 Dados simulados de concentração molar por tempo para experimentos sem tratamento osmótico

Tabela 7.5: Dados simulados de concentração molar por tempo para experimentos sem tratamento osmótico

Tempo (min)	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5
0	36761,11	36761,11	36761,11	36761,11	36761,11
600	36751,37	36759,47	36758,91	36756,01	36759,06
1200	36427,44	36654,78	36630,66	36550,48	36619,24
1800	35395,16	36182,70	36077,33	35750,69	36005,77
2400	33862,49	35337,77	35092,42	34423,98	34917,62
3000	32141,67	34255,74	33838,13	32824,55	33536,35
3600	30392,88	33061,41	32473,63	31112,50	32039,49
5400	25598,26	29455,50	28411,86	26188,63	27543,41
7200	21730,71	26234,06	24860,66	22026,98	23542,01
9000	18675,59	23460,89	21884,41	18635,22	20113,68
10800	16249,25	21106,44	19403,71	15868,01	17218,24
12600	14340,89	19140,33	17341,81	13621,17	14814,46
14400	12839,75	17525,48	15616,11	11798,11	12834,60
16200	11657,48	16221,15	14187,94	10319,34	11235,16
18000	10733,22	15180,18	13015,37	9121,04	9972,77
19800	10013,61	14333,26	12063,07	8151,96	8982,76
21600	9455,97	13678,52	11303,36	7370,52	8208,10
23400	9026,08	13154,20	10690,25	6741,04	7618,88
25200	8691,56	12773,31	10206,52	6221,49	7171,62
27000	8427,14	12465,60	9829,78	5809,76	6827,11
28800	8226,31	12250,05	9529,54	5474,46	6567,37
30600	8073,30	12075,88	9298,03	5220,59	6373,30
32400	7962,74	11957,33	9119,91	50124,70	6227,21
34200	7878,02	11861,41	8974,40	4858,09	6109,81
36000	7818,55	11797,56	8866,31	4732,08	6025,00

Fonte: Autoria Própria, 2018.

7.6 Dados simulados de concentração molar por tempo para experimentos com tratamento osmótico

Tabela 7.6: Dados simulados de concentração molar por tempo para experimentos com tratamento osmótico.

Tempo (min)	Exp.6	Exp.7	Exp.8	Exp.9	Exp.10
0	31671,11	29974,44	31105,56	29205,29	29974,44
600	31661,99	29973,19	31098,01	29201,39	29972,75
1200	31369,24	29887,94	30818,04	29044,64	29857,08
1800	30445,50	29504,96	29937,39	28431,89	29349,19
2400	29081,60	28811,56	28638,99	27412,81	28448,25
3000	27543,72	27917,22	27184,80	26175,05	27304,92
3600	25995,60	26938,96	25711,89	24853,47	26066,46
5400	21747,91	23968,88	21675,79	21042,46	22344,81
7200	18330,54	21306,17	18407,31	17812,31	19033,20
9000	15638,45	190120,22	15799,84	15167,61	16195,49
10800	13526,34	17065,36	13710,46	13016,68	13799,23
12600	11838,33	15429,34	12046,81	11272,49	11808,75
14400	10503,72	140789,84	10749,31	9854,84	10170,87
16200	9462,75	12982,36	9748,03	8703,71	8846,74
18000	8651,57	12102,42	8979,10	7769,73	7801,27
19800	8021,41	11414,93	8402,13	7013,38	6984,91
21600	7530,01	10876,47	7974,03	6399,52	6343,29
23400	7153,40	10458,58	7658,86	5894,05	5854,54
25200	6866,76	10143,32	7426,86	5488,39	5484,02
27000	6647,66	9901,33	7245,79	5163,65	5201,33
28800	6473,58	9711,47	7118,08	4908,33	4984,95
30600	6344,91	9569,93	7020,17	4706,85	4823,68
32400	6244,96	9459,22	6957,55	4548,14	4702,15
34200	6175,62	9380,27	6908,14	4426,33	4604,81
36000	6120,99	9318,69	6878,22	4329,16	4534,06

Fonte: Autoria Própria, 2018.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, J.M.; FILHO, J.F. Desidratação de frutas e hortaliças. Manual técnico. Campinas/SP: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 2002.

ALMEIDA, C. A.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; SILVA, F. L. H. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. Revista de Biologia e Ciências da Terra. v. 6, n. 1, 1º sem., 2006.

ALVES, L.M. Apostila de Método dos elementos de contorno. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ANTONIO, G. C. Influência da estrutura celular e da geometria da amostra na taxa de transferência de massa do processo de desidratação osmótica de banana nanica (Musa Cavendishi) e de mamão formosa (Carica papaya L.). Campinas: UNICAMP, 2002. 104p. (Dissertação de mestrado em Engenharia de Alimentos).

ARÉVALO-PINEDO, A.; MURR, F.E.X. Kinetics of vacum drying of pumpkin (Cucurbita máxima): Modeling with shrinkage. Journal of Food Engineering, v.76, Issue 4, 2006.

AZEREDO, H. M. C.; FARIA, J. A. F.; AZEREDO, A. M. C. Embalagens ativas para alimentos. Revista de Ciência e Tecnologia de Alimentos. Campinas, v.20, n.3, p.337-341, 2000.

AZEVEDO, A.F.M. Método dos Elementos Finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1ª Edição, 2003.

BATISTA, L.M.; DA ROSA, C.A.; PINTO, L.A.A. Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan. Journal of Food Engineering, v.81, p.127-132, 2007.

BERBARI, S. A. G.; MENEGALE, L. L. C.; ALMEIDA, M. E. Processamento e controle de qualidade de frutas cristalizadas. Revista de Higiene Alimentar, v.6, n.24, p.28-30, 1992.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. Transport Phenomena. New York, USA: John Wiley & Sons, São Paulo: EPUSP, 2008.

BOLIN, H.R., Huksoll, C.C., Jackson, R., NG, K.C Effect of osmotic agents and concentration on fruit quality. Journal of Food Science, 48: 202-205, 1983.

BORSATO, D. et al. Modelagem e simulação da difusão multicomponente durante a desidratação osmótica em pedaços de melão. *Alim. Nutr.*, v. 22, n. 3, p. 379-389, 2011.

BORGES, A.L.; CALDAS, R.C. Teores de nutrientes nas folhas de bananeira, cv. Pacovan, sob irrigação, v.28, No. 5, 2004,

BRASIL. *Lei complementar nº 155, de 27 de outubro de 2016.* Altera a Lei Complementar no 123, de 14 de dezembro de 2006, para reorganizar e simplificar a metodologia de apuração do imposto devido por optantes pelo Simples Nacional;.Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp155.htm>

BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. Secagem de produtos agrícolas. XI SEMEAGRI ¾ Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Campinas: Agrológica ¾ Empresa Júnior de Engenharia Agrícola. 1999, 122p.

BRUNINI, M.A.; DURIGAN, J.F.; OLIVEIRA. A.L.D. Avaliação das alterações em polpa de manga “Tommy-Atkins” congeladas”, Revista Brasileira Fruticultura, v.24, nº3, Jaboticabal-SP, 2002.

CAMARGO, A. C. Conservação de alimentos. USP – CENA/PCLQ. São Paulo, setembro de 2006. Disponível em: http://www.cena.usp.br/irradiacao/cons_alim.html 2006>. Acesso em: 18 setembro. 2018.

CANO-CHAUCA, M.; RAMOS, A.M.; STRINGHETA, P.C.; MINIM, V.P.; ANDRADE, N.J. Análisis físico-química, sensorial y microbiológico de la banana pasa. Alimentaría, v. 329, p.119-122, 2002a.

CAVALCANTE, P.B. *Frutas comestíveis da Amazônia*. 4 ed. MCT/CNPq. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi: Coleção Adolfo Duçke. 279 p., 1988.

CELESTINO, S.M.C. Princípios de Secagem de Alimentos. Embrapa, 2010.

COHEN, J. S.: YANG, C.S. Progress in food dehydration. Trends. *In* Food Science and Technology, 6: 20-24, 1995.

COOK, R.D. Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CÓRDOVA, K.R. Desidratação Osmótica e Secagem Convectiva de Maçã Fuji comercial e industrial. Dissertação de Mestrado, Curitiba-PR, 2006.

CRANK.J. The mathematics of diffusion. Oxford: Clarendon Press, 1995.

CREMASCO, Marco Aurélio. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. São Paulo: Blucher, 2012.

CRUZ, G.R.B.D.; FRANCISCO, M.S.; ARAÚJO, R.D.C.; SANTOS, E.P.D.; GOMES, F.F.B. Efeito das condições de manejo nas características sensoriais de banana (Musa spp.) cv. Pacovan. Revista Brasilera Fruticultura, v.36, no.2, 2014.

CURCIO, S.; AVERSA, M.; CALABRÓ, V.; IORIO, G. Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation. Journal Food Engineering, v.87, p.541-563,2008.

DANTAS, J.L.L.; SOARES FILHO, W.S. *Banana para exportação: aspecto técnico da produção*. Secretaria de Desenvolvimento Rural. Programa de Apoio à Produção e exportação de Frutas e Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais-FRUPEX, p.9., 1997.

DAVILA, R.F.Z. Mathematical modeling of drying process of unripe banana slices. Tese de Doutorado em Ciência, São Paulo, 2016.

DELGADO, J.M.P.Q.; YENGEJEH, S.I.; LIMA, A.G.B.D; OCHSNER, A. Numerical Simulation of the vibration behaviour of curved carbon nanotubes, Advances in Materials Science and Engineering, 2014.

DEMIREL, D.; TURHAN, M. Air-drying behaviour of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. Journal of Food Engineering, v.59, Issue 1, 2003.

DHATT,G.; TOUZOUT, G.; LEFRANÇOES, E. Finit Element Method. Numerical Methods Series, 2012.

EDGAR T.F.; HIMMELBLAU D.M. Optimization of Chemical Processes, New York: Editora McGraw-Hill, 2001.

EL-QUAR, A.A.; MURR F.E.X.. Estudo e modelagem da cinética de desidratação osmótica do mamão formosa (carica papaya L). Revista de Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.23, p.69-75, 2003.

FARIAS, E.S.; Gouveia, J.P.G.; Almeida, F.A.C.; Bruno, L.A.; Nascimento, J. Secagem de cajá em um secador de leito fixo. In: Congresso Brasileiro de Fruticultura, 18, 2002, Belém. Anais... SBF: Belém, 2002.

GASPARETO, O.C.P. Secagem osmo-convectiva de Banana Nanica (Musa Cavendishi L.), Mamão Formosa (Carica Papaya, L.) e Jaca (Artocarpus Integrifólia L.). Tese de Doutorada, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

GAVA, A.J*. Princípios de tecnologia de alimentos*, 2.ed. São Paulo: Nobel, 2000.

GEANKOPLIS, Christie John. Transport processes and separation process principles: includes unit operations. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2009.

GONÇALVEZ, N.D.F. Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências do Porto, 2007.

GREENSMITH, M. Practical Dehydration, Woodhead Publishing Series in Food Science and Technology, 2nd edition, 1997.

HOLMAN, J.P. Experimental methods for engineers. , fifth edition, McGraw-Hill Books, New York, 1986.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografa e Estatistica. Previsão de safra. Disponível em: <www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 19 nov. 2018.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema de Recuperação Automática - SIDRA. (2014). Disponível em <Disponível em http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/prevsaf/default.asp?z=t&o=26&i=P >. Acesso em 18 de nov. 2018.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

INTITUTO ADOLFO LUTZ. *Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos físicos e químicos para análise de alimentos*. 3. ed. V.1 São Paulo, 1985.

KARATHANOS, V.T.; BELESSIOTIS, V.G. Application of a Thin-Layer Equation to Drying Data of Fresh and Semi-dried Fruits, v.74, Issue 4, 1999.

KERN, P. Aplicação do modelo SCBR no gerenciamento de áreas contaminadas: análise da funcionalidade “áreas reativas” para simulação de tecnologias de bioestimulação, Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia Sanitária e Ambiental, 2016.

KUMAR, C. et al. Multiphysics modeling of convective drying of food materials. In Proceedings of the Global Engineering, *Science and Technology Conference*, Global Institute of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh. 2012.

LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. Drying Technology. New York-US, v.14, n.2, p.391-413, 1996.

LENART, A., Piotrowski, D. Drying characteristics of osmotically dehydrated fruits coated with semi permeable edible films. In: KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S. Drying Technology. New York: MARCEL DEKKER, vol.19, n.5, p. 849-877, 2001.

LICHTEMBERG, Luiz Alberto. Pós-colheita de banana. In: Simpósio Norte Mineiro sobre a Cultura da Banana, 1, 2001, Nova Porteirinha. Anais.... Nova Porteirinha: EPAMIG, p.105-130, 2001.

LUYBEN, W. L. Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers. New York: McGraw-Hill, 2013.

MAEDA, M.; LORETO, R.L. Osmotic dehydration of bananas. Seminário Ciências Agrárias, Vol 19, No 1 (1998)

MALONEY, J. O. Perry’s Chemical Enginners Handbook. 8. ed. McGraw-Hil, 2008.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. Journal of Food Engineering, v.61, n.3, p.373-386, 2003.

MOREIRA, I.; NÓBREGA, M.M.; MOREIRA, M.B.; BORSATO, D. Modelagem e Simulação da desidratação osmótica em pedações de abacaxi utilizando o método de elementos finitos. Revista Química Nova, v.32, no.8, 2009.

MANICA, I. Bananas: do plantio ao amadurecimento. Porto Alegre: Cinco Continentes, 1998. p.99.

NICOLIN, D.J.; ROSSONI, D.F.; JORGE, L.M.M. Estudo das incertezas no ajuste da difusividade efetiva a partir da solução analítica da segunda lei de Fick. Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, UFSCAR, 2015.

ORGANICNET. Produtos orgânicos ganham a mesa do brasileiro. Disponível em: http://www.organicsnet.com.br/2014/12/produtos-organicos-ganham-a-mesa-do-brasileiro/ . Acesso em nov. 2018, 2014.

PARK, K. J., ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R. A.; PAR, K. J. B. Conceitos de processo e equipamentos de secagem, Campinas-SP, 2007.

PARK, K. J., BIN, A., BROD, F.P.R. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. Journal of Food Engineering, 56: 97-103, 2002.

PERUSSELO, C. A. *Análise numérica e experimental da secagem osmo-convectiva do yacon.* 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

POKHARKAR, S.M.; PRASAD, D.H. A model of osmotic concentration of banana slices. J Food Sci Techologic, v.34, 1997.

PONTES, S.F.O. Processamento e Qualidade da Banana da Terra (Musa sapientum) desidratada, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2009.

QI, H.; LE MAGUER, M.; SHARMA, S. K. Design and selection of processing conditions of a pilot scale contactor for continuous osmotic dehydration of carrots. Journal of Food Process Engineering, Westport, Connecticut-US, v.21, n.1, p.75-88, 1998.

RAOULT-WACK, A.L. Recent advances in the osmotic dehidration of foods. Trends in Food Science & Technology, v.5, p.255-260, 1994.

SANDHU, S. K. *COMSOL assisted modeling of a climbing film evaporator.* 2010. Dissertation (Bachelor of Science) – Worcester Polytechnic Institute, 2010.

SANTANA, F.F.; AUGUSTO, P.E.D.; CRISTIANINI, M. Determination of the convective heat transfer coefficient (h) in the sterilization of retortable pouches. International Food Engineering, v.7 issue1, article 10, 2011.

Secretaria Especial de Agricultura Familiar e do desenvolvimento Agrário. Produção de banana cresce 20% no Amazonas. Disponível em ://www.mda.gov.br/sitemda/noticias/produ%C3%A7%C3%A3o-de-banana-cresce-20-no-amazonas. Acesso em 23/11/18, 2017.

SILVA, C.A.B. [Coord.]. Produção de banana passa. Brasília: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria do Desenvolvimento Rural, 1995, 32p. (Série Perfis Agroindustriais, v. 5).

SILVA, J.A; BAIA, R.T.; RODRIGUES, W.L. Simulação do processo de secagem osmoconvectiva de banana prata, XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Unicamp-SP, 2015.

SOLAR. Disponível em: < http://www.ediurb.sites.uol.com.br/solar.html>. Acesso em 19 nov/2018, 2009.

SOTO, M. Situación y avances tecnologicos en la producción bananera mundial. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.33, p.013-028, 2011.

TODA FRUTA. Informações econômicas sobre a banana. Disponível em: Acesso em: 30/09/2018, 2009.

TORREGGIANNI, D. Osmotic Dehydration in fruit and vegetable processing. Food Research International, v.26, 1st ed., 1993.

VAGENAS, G.K.; KARATHANOS, V.T. Prediction of the effective moisture diffusivity in gelatinized food systems. Journal of Food Engineering, v.18, p.15-35, 1993.

VERSTEERG, H.K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computacional Fluid Dynamics. The Finite volume method. Second Edition, 2007.

WELTY, J.R.; WICKS, C.E.; WILSON, R.E.; RORRER, G.L. Fundamentals of Momentum, heat and mass transfer. 5th Edition, Wiley, Hoboken, 2008.

WOJEICCHOWSKI, J. P., RAMOS, A. P., SOUSA, J.S., MACIEL, L. G., PARIONA, M.M. *Modelagem da Perda de Umidade da Banana durante o Processo de Secagem*. COMSOL Conference, Curitiba/PR 2015.

YUYAMA, L. K.O.; MACEDO, S. H. M.; YONEKURA, L.; AGUIAR J. P. L; YUYAMA, K. Perfil Nutricional das Diversas Formas de Banana (Musa paradisíaca, variedade pacovã) da Amazônia Brasileira, Coordenação de Pesquisas em Ciência da Saúde – INPA, 2000.

ZEINELDIN, T. Modeling the process of drying stationary objectis inside a tumble drying using COMSOL Multiphysics. Hannover, *COMSOL Conference*, 2008.

ZENDIM, J.L. Secagem do fruto Cubiu em estuda com circulação forçada de ar: Efeito na composição nutricional e funcional, Universidade Federal do Amazonas, 2017.